



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA

**CRIAÇÃO DE UM BLOCO VIRTUAL PADRÃO DE
CARGAS PARA AVALIAÇÃO DE FADIGA DO VEÍCULO,
ISODANO COM PROVAS EXPERIMENTAIS DE
DURABILIDADE PARA CHASSIS E CARROCERIAS.**

MARCO TÚLIO BATISTA DOS ANJOS

Belo Horizonte, 12 de dezembro de 2019.

Marco Túlio Batista dos Anjos

**CRIAÇÃO DE UM BLOCO VIRTUAL PADRÃO DE
CARGAS PARA AVALIAÇÃO DE FADIGA DO VEÍCULO,
ISODANO COM PROVAS EXPERIMENTAIS DE
DURABILIDADE PARA CHASSIS E CARROCERIAS.**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Projetos e Sistemas

Orientador: Prof. Dr. Juan Carlos Horta Gutierrez

Universidade Federal de Minas Gerais

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2019

A599c	<p>Anjos, Marco Túlio Batista dos. Criação de um bloco virtual padrão de cargas para avaliação de fadiga do veículo, isodano com provas experimentais de durabilidade para chassis e carrocerias [recurso eletrônico]/Marco Túlio Batista dos Anjos. - 2019. 1 recurso online (135 f. : il., color.) : pdf. Orientador: Juan Carlos Horta Gutierrez. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia. Anexos: f. 122-135. Bibliografia: f. 118-122. Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader. 1. Engenharia mecânica - Teses. 2. Durabilidade (Engenharia) - Teses. 3. Fadiga - Teses. 4. Método dos elementos finitos - Teses. I. Gutierrez, Juan Carlos Horta. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.</p>
	CDU: 621 (043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA

Av. Antônio Carlos, 6627 - Campus Universitário
31270-901 - Belo Horizonte - MG
Tel.: +55 31 3409.5145
E-mail: epgmec@demec.ufmg.br

**"CRIAÇÃO DE UM BLOCO VIRTUAL PADRÃO DE CARGAS PARA
AVALIAÇÃO DE FADIGA DO VEÍCULO, ISODANO COM PROVAS
EXPERIMENTAIS DE DURABILIDADE PARA CHASSIS E
CARROCERIAS."**

MARCO TÚLIO BATISTA DOS ANJOS

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de "**Mestre em Engenharia Mecânica**", na área de concentração de "**Projeto e Sistemas**".

Dissertação aprovada no dia 12 de dezembro de 2019.

Por:

Prof. Juan Carlos Horta Gutierrez
Orientador - Departamento de Engenharia Mecânica/ UFMG

Prof. Antônio Ferreira Ávila
Departamento de Engenharia Mecânica/ UFMG

Prof. Ernani Sales Palma
Departamento de Engenharia Mecânica/ UFMG

AGRADECIMENTOS

À Deus que me proporcionou sabedoria, inteligência e saúde para completar mais essa tarefa. A minha mãe Sandra e minhas irmãs Stelita e Sílvia pelo apoio e paciência.

Aos meus colegas de FCA – Fiat Chrysler Automobiles pelo apoio incondicional sem o qual não teria feito este trabalho.

Meus agradecimentos.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	7
LISTA DE GRÁFICOS	9
LISTA DE TABELAS E QUADROS	14
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	16
NOMENCLATURAS	17
RESUMO	19
1. INTRODUÇÃO	20
1.1 Objetivos	22
1.2.1 Objetivos Gerais	22
1.2.2 Objetivos Específicos	22
1.2 Estrutura do Trabalho	23
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	24
2.1 Métodos numéricos aplicados à engenharia e pesquisa	24
2.2 Métodos Virtuais e Experimentais de predição de cargas e reprodução de Perfis de Pistas	28
2.3 Metodologia FCA - Virtual Road Load Data Aquisition (vRLDA)	33
2.3.1 Escolha adequada dos algoritmos em elementos finitos	36
2.3.2 Modelo de pneu	39
2.3.3 Digitalização das pistas	45
2.4 Acúmulo de danos e contagem de ciclos	47
2.4.1 Mecanismo do dano à fadiga	48
2.4.2 Teoria linear de acúmulo de danos	49
2.4.3 Contagem de Ciclos	52
2.5 Ensaios de durabilidade físicos em campo e em banco de testes	55
2.5.1 <i>Latam Durability Schedule - LDS</i>	55
2.5.2 Provas a banco para durabilidade chassi	58

3. METODOLOGIA	63
3.1 Cálculo do dano acumulado baseado em dados reduzidos pelo Tecware	63
3.2 Projetos utilizados para validação do percurso virtual proposto	69
3.3 Sinais LDS	69
3.4 Provas a banco	72
3.5 Modelos vRLDA dos quatro projetos	75
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	81
4.1 Resultados de Level Crossing das passagens em pistas virtuais e manobras estáticas	81
4.2 Número de repetições e bloco de fadiga virtual isodano às provas experimentais	95
5. CONCLUSÕES	114
5.1 Comparativo virtual x provas experimentais das forças resultantes	114
5.2 Elaboração das repetições em cada percurso e manobra virtual baseados nos danos acumulados e ajuste final do bloco	115
5.3 Trabalhos futuros	116
ABSTRACT	117
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	118
ANEXO A	122
A.1 – Level Crossing sinais LDS das cargas verticais resultantes do Calçamento e Terra	122

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 – Suporte de motor sob análise (a) Vista superior - (b) Vista inferior do volume máximo do suporte a ser “otimizado”, (c) Resultado de tensões do suporte <i>otimizado</i>	25
FIGURA 2.2 – Modelo FEA para ensaio de torção na carroceria.....	26
FIGURA 2.3 - (a) Esboço de um <i>Four-Poster</i> utilizado nos testes em laboratório, (b) Exemplo real de veículo submetido a teste no <i>Four-Poster</i>	29
FIGURA 2.4 - (a) Perfis de pistas para coleta de dados - 1: <i>Asphalt</i> (Asfalto); 2: <i>Gravel</i> (Cascalho); 3: <i>Pave</i> (Calçamento); 4: <i>Speed Hump</i> (Quebra-molas), (b) Respectivas Respostas em frequência resultante das passagens em cada pista.	29
FIGURA 2.5 – Combinação das técnicas Implícita e Explícita aplicadas em um modelo de veículo completo passando sobre um obstáculo.	30
FIGURA 2.6 - (a) Veículo virtual sob teste (b) Resultado da história temporal de forças transmitidas a carroceria.	32
FIGURA 2.7 - (a) Resultado de PSD da aceleração vertical do eixo dianteiro, (b) Resultado de PSD da aceleração vertical do eixo traseiro.....	32
FIGURA 2.8 – Exemplo de um modelo vRLDA (virtual Road Load Data Aquisition).....	34
FIGURA 2.9 – Exemplo de um modelo de suspensão <i>Mc-Pherson</i> modelada no vRLDA	36
FIGURA 2.10 – Exemplo de modelos de Pneus Multicorpos (a) modelo <i>Pirelli</i> ; (b) modelo <i>MF-Swift</i> de pneu vista lateral e posterior	40
FIGURA 2.11 – Exemplo de um modelo de Pneu vRLDA – (a) Malha do modelo FEM vRLDA do pneu; (b) – Vista em corte da malha do pneu	41
FIGURA 2.12 – (a) Resultado do escaneamento do trecho de pista <i>Pave</i> com textura; (b) Resultado do mesmo trecho sem textura (mais nítido).....	45
FIGURA 2.13 – Malha da pista com elementos rígidos utilizada no vRLDA	46
FIGURA 2.14 – Esquema da formulação Euleriana da pista digitalizada	47
FIGURA 2.15 – Modelo vRLDA utilizando a pista com a mescla da formulação Lagrangeana e Euleriana.....	47
FIGURA 2.16 – Mecanismo de dano por fadiga.	49
FIGURA 2.17 – Sequência de carregamentos e curva S-N de fadiga para predição de vida.	50
FIGURA 2.18 – Exemplo de um sinal (<i>Pave Belga</i>) aleatório proveniente de passagem de pista.	52

FIGURA 2.19 – Exemplo de uma contagem de ciclos por <i>Level Crossing</i> todos os níveis.	53
FIGURA 2.20 – Exemplo de uma contagem de ciclos por <i>rainflow</i>	54
FIGURA 2.21 – Tipos de pavimentos utilizados no LDS - (a) Calçamento de pedra; (b) Percurso de terra.	56
FIGURA 2.22 – Pesos adicionais para a realização do LDS a plena carga.	56
FIGURA 2.23 – Carro protótipo instrumentado para o LDS conforme norma FCA LP.7T015. (a) – Veículo pronto para o teste; (b) detalhe da roda dinamométrica para medição de cargas no centro roda; (c) Instrumentação no interior do veículo; (d) exemplo de um acelerômetro colado no trilho do banco.	58
FIGURA 2.24 - As três direções do veículo consideradas para as provas a banco.	59
FIGURA 2.25 – Exemplo de uma curva de força x carga de reação.	60
FIGURA 2.26 – Esquema prova de fadiga vertical – Vista frontal da suspensão.	61
FONTE: Própria do autor	61
FIGURA 2.27 – Esquema prova de fadiga lateral – Vista frontal da suspensão.	61
FIGURA 2.28 – Esquema prova de fadiga longitudinal – Vista Superior da suspensão.	62
FIGURA 3.1: Processo de simplificação dos sinais pelo <i>Tecware</i>	64
FIGURA 3.2: Representação da curva S-N fadiga padrão.	66
FIGURA 3.3: Fluxograma simplificado do cálculo feito no <i>Tecware</i>	68
FIGURA 3.4 – Modelos vRLDA (a) – projeto 1 – Suspensões: <i>Mc-Pherson</i> e Eixo de Torção; (b) Projeto 2 – Suspensões: <i>Mc-Pherson</i> e Eixo de torção; (c) Projeto 3 – Suspensões: <i>Mc-Pherson</i> e Eixo Rígido com mola balestra; (d) Projeto 4 – Suspensões: <i>Mc-Pherson</i> e <i>Multilink</i>	77
FIGURA 3.5 – Perfil da pista virtual digitalizada <i>Pave Belga</i> (calçamento).....	78
FIGURA 3.6 – Obstáculo <i>PotHole</i> . Exemplo de um carro passando sobre o <i>PotHole</i> e suas dimensões. (a) – Exemplos de buracos nas vias do percurso LDS; (b) – Prova experimental de passagem no obstáculo <i>PotHole</i> ; (c) – Prova virtual de passagem no obstáculo <i>PotHole</i> com um modelo vRLDA Destacado em vermelho a grande deformação provocada no pneu e conseqüentemente altas cargas longitudinais e verticais.	79
FIGURA 3.7 – Exemplos de manobras estáticas no modelo vRLDA para simulação das provas a banco (a) - veículo “parado”; (b) - veículo sob aceleração da gravidade 1g em y + (curva a esquerda); (c) - veículo “parado”; (d) – veículo sob aceleração 1g longitudinal em x – (frenagem).	80

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 4.1 – Comparativo do Level Crossing resultante da história temporal das forças longitudinais do eixo dianteiro da prova de Fadiga a Banco longitudinal x passagens de pistas virtuais digitalizadas para o projeto 1.	82
GRÁFICO 4.2 – Comparativo do Level Crossing resultante da história temporal das forças longitudinais do eixo dianteiro da prova de Fadiga a Banco longitudinal x passagens de pistas virtuais digitalizadas para o projeto 2.	83
GRÁFICO 4.3 – Comparativo do Level Crossing resultante da história temporal das forças longitudinais do eixo dianteiro da prova de Fadiga a Banco longitudinal x passagens de pistas virtuais digitalizadas para o projeto 3.	84
GRÁFICO 4.4 – Comparativo do Level Crossing resultante da história temporal das forças longitudinais do eixo dianteiro da prova de Fadiga a Banco longitudinal x passagens de pistas virtuais digitalizadas para o projeto 4.	84
GRÁFICO 4.5 – Comparativo do Level Crossing resultante da história temporal das forças laterais do eixo dianteiro da prova de Fadiga a Banco lateral x passagens de pistas virtuais digitalizadas para o projeto 1.	85
GRÁFICO 4.6 – Comparativo do Level Crossing resultante da história temporal das forças laterais do eixo traseiro da prova de Fadiga a Banco lateral x passagens de pistas virtuais digitalizadas para o projeto 1.	85
GRÁFICO 4.7 – Comparativo do Level Crossing resultante da história temporal das forças laterais do eixo dianteiro da prova de Fadiga a Banco lateral x passagens de pistas virtuais digitalizadas para o projeto 2.	86
GRÁFICO 4.8 – Comparativo do Level Crossing resultante da história temporal das forças laterais do eixo traseiro da prova de Fadiga a Banco lateral x passagens de pistas virtuais digitalizadas para o projeto 2.	87
GRÁFICO 4.9 – Comparativo do Level Crossing resultante da história temporal das forças laterais do eixo dianteiro da prova de Fadiga a Banco lateral x passagens de pistas virtuais digitalizadas para o projeto 3.	87

GRÁFICO 4.10 – Comparativo do Level Crossing resultante da história temporal das forças laterais do eixo traseiro da prova de Fadiga a Banco lateral x passagens de pistas virtuais digitalizadas para o projeto 3.	88
GRÁFICO 4.11 – Comparativo do Level Crossing resultante da história temporal das forças laterais do eixo dianteiro da prova de Fadiga a Banco lateral x passagens de pistas virtuais digitalizadas para o projeto 4.	89
GRÁFICO 4.12 – Comparativo do Level Crossing resultante da história temporal das forças laterais do eixo traseiro da prova de Fadiga a Banco lateral x passagens de pistas virtuais digitalizadas para o projeto 4.	89
GRÁFICO 4.13 – Comparativo do Level Crossing resultante da história temporal das forças verticais do eixo dianteiro do LDS x passagens de pistas virtuais digitalizadas para o projeto 1.	90
GRÁFICO 4.14 – Comparativo do Level Crossing resultante da história temporal das forças verticais do eixo traseiro do LDS x passagens de pistas virtuais digitalizadas para o projeto 1.	90
GRÁFICO 4.15 – Comparativo do Level Crossing resultante da história temporal das forças verticais do eixo dianteiro do LDS x passagens de pistas virtuais digitalizadas para o projeto 2.	91
GRÁFICO 4.16 – Comparativo do Level Crossing resultante da história temporal das forças verticais do eixo traseiro do LDS x passagens de pistas virtuais digitalizadas para o projeto 2.	91
GRÁFICO 4.17 – Comparativo do Level Crossing resultante da história temporal das forças verticais do eixo dianteiro do LDS x passagens de pistas virtuais digitalizadas para o projeto 3.	92
GRÁFICO 4.18 – Comparativo do Level Crossing resultante da história temporal das forças verticais do eixo traseiro do LDS x passagens de pistas virtuais digitalizadas para o projeto 3.	92
GRÁFICO 4.19 – Comparativo do Level Crossing resultante da história temporal das forças verticais do eixo dianteiro do LDS x passagens de pistas virtuais digitalizadas para o projeto 4.	93

GRÁFICO 4.20 – Comparativo do Level Crossing resultante da história temporal das forças verticais do eixo dianteiro do LDS x passagens de pistas virtuais digitalizadas para o projeto 4.	93
GRÁFICO A1 – Resultados Level Crossing eixo dianteiro Projeto 1 no percurso de Terra carro carregado – 2 passagens feitas.	122
GRÁFICO A2 – Resultados Level Crossing eixo traseiro Projeto 1 no percurso de Terra carro carregado – 2 passagens feitas.	123
GRÁFICO A3 – Resultados Level Crossing eixo dianteiro Projeto 1 no percurso de Calçamento carro carregado – 3 passagens feitas.	123
GRÁFICO A4 – Resultados Level Crossing eixo traseiro Projeto 1 no percurso de Calçamento carro carregado – 3 passagens feitas.	124
GRÁFICO A5 – Resultados Level Crossing eixo dianteiro Projeto 1 no percurso de Calçamento carro vazio – 3 passagens feitas.	124
GRÁFICO A6 – Resultados Level Crossing eixo traseiro Projeto 1 no percurso de Calçamento carro vazio – 3 passagens feitas.	124
GRÁFICO A7 – Resultados Level Crossing eixo dianteiro Projeto 2 no percurso de Terra carro carregado – 2 passagens feitas.	125
GRÁFICO A8 – Resultados Level Crossing eixo traseiro Projeto 2 no percurso de Terra carro carregado – 2 passagens feitas.	126
GRÁFICO A9 – Resultados Level Crossing eixo dianteiro Projeto 2 no percurso de Terra carro vazio – 2 passagens feitas.	126
GRÁFICO A10 – Resultados Level Crossing eixo traseiro Projeto 2 no percurso de Terra carro vazio – 2 passagens feitas.	126
GRÁFICO A11 – Resultados Level Crossing eixo dianteiro Projeto 2 no percurso de Calçamento carro carregado – 3 passagens feitas.	127
GRÁFICO A12 – Resultados Level Crossing eixo traseiro Projeto 2 no percurso de Calçamento carro carregado – 3 passagens feitas.	127
GRÁFICO A13 – Resultados Level Crossing eixo dianteiro Projeto 2 no percurso de Calçamento carro vazio – 3 passagens feitas.	127

GRÁFICO A14 – Resultados Level Crossing eixo traseiro Projeto 2 no percurso de Calçamento carro vazio – 3 passagens feitas.....	128
GRÁFICO A15 – Resultados Level Crossing eixo dianteiro Projeto 3 no percurso de Terra carro carregado – 6 passagens feitas	129
GRÁFICO A16 – Resultados Level Crossing eixo traseiro Projeto 3 no percurso de Terra carro carregado – 6 passagens feitas.	129
GRÁFICO A17 – Resultados Level Crossing eixo dianteiro Projeto 3 no percurso de Terra carro vazio – 6 passagens feitas.	129
GRÁFICO A18 – Resultados Level Crossing eixo traseiro Projeto 3 no percurso de Terra carro vazio – 6 passagens feitas.	130
GRÁFICO A19 – Resultados Level Crossing eixo dianteiro Projeto 3 no percurso de Calçamento carro carregado – 3 passagens feitas.....	130
GRÁFICO A20 – Resultados Level Crossing eixo traseiro Projeto 3 no percurso de Calçamento carro carregado – 3 passagens feitas.....	130
GRÁFICO A21 – Resultados Level Crossing eixo dianteiro Projeto 3 no percurso de Calçamento carro vazio – 3 passagens feitas.....	131
GRÁFICO A22 – Resultados Level Crossing eixo dianteiro Projeto 3 no percurso de Calçamento carro vazio – 3 passagens feitas.....	131
GRÁFICO A23 – Resultados Level Crossing eixo dianteiro Projeto 4 no percurso de Terra carro carregado – 4 passagens feitas.	132
GRÁFICO A24 – Resultados Level Crossing eixo traseiro Projeto 4 no percurso de Terra carro carregado – 4 passagens feitas.	133
GRÁFICO A25 – Resultados Level Crossing eixo dianteiro Projeto 4 no percurso de Terra carro vazio – 4 passagens feitas.	133
GRÁFICO A26 – Resultados Level Crossing eixo traseiro Projeto 4 no percurso de Terra carro vazio – 4 passagens feitas.	133
GRÁFICO A27 – Resultados Level Crossing eixo dianteiro Projeto 4 no percurso de Calçamento carro carregado – 3 passagens feitas.....	134
GRÁFICO A28 – Resultados Level Crossing eixo traseiro Projeto 4 no percurso de Calçamento carro carregado – 3 passagens feitas.....	134

GRÁFICO A29 – Resultados Level Crossing eixo dianteiro Projeto 4 no percurso de Calçamento carro carregado – 3 passagens feitas.....	134
GRÁFICO A30 – Resultados Level Crossing eixo traseiro Projeto 4 no percurso de Calçamento carro carregado – 3 passagens feitas.....	135

LISTA DE TABELAS E QUADROS

TABELA 3.1 Fator k versus Amplitude de carga e vida a fadiga.....	67
TABELA 3.2 Parâmetros dos quatro projetos utilizados no presente trabalho	69
TABELA 3.3 Distribuição do circuito LDS projeto 1	70
TABELA 3.4 Distribuição do circuito LDS projeto 2.....	70
TABELA 3.5 Distribuição do circuito LDS projeto 3.....	70
TABELA 3.6 Distribuição do circuito LDS projeto 4.....	70
TABELA 3.7 Número de repetições de cada sinal para composição do dano total LDS – Projeto 1 – <i>Hatch</i> pequeno	71
TABELA 3.8 Número de repetições de cada sinal para composição do dano total LDS – Projeto 2 – <i>Hatch</i> médio	71
TABELA 3.10 Número de repetições de cada sinal para composição do dano total LDS – Projeto 4 – Pick-up (passeio).....	72
TABELA 3.11 Cargas para fadiga vertical.....	73
TABELA 3.12 Cargas para fadiga lateral.....	74
TABELA 3.13 Cargas para fadiga longitudinal.....	75
TABELA 4.1 Cálculo número de repetições para o <i>Pave Belga</i> para direção vertical..	96
TABELA 4.2 Cálculo número de repetições de manobras de acelerações e frenagens...	98
TABELA 4.3 Cálculo número de repetições de manobras de curvas	99
TABELA 4.4 Severidade do dano acumulado Vertical entre bloco virtual e provas experimentais	102
TABELA 4.5 Severidade do dano acumulado Longitudinal entre bloco virtual e provas experimentais	103
TABELA 4.6 Severidade do dano acumulado Lateral entre bloco virtual e prova sexperimentais	104

TABELA 4.7 Severidade do dano acumulado Vertical entre bloco virtual e provas experimentais com as novas repetições	106
TABELA 4.8 Severidade do dano acumulado Longitudinal entre bloco virtual e provas experimentais com as novas repetições	107
TABELA 4.9 Severidade do dano acumulado Lateral entre bloco virtual e provas experimentais com as novas repetições	109
TABELA 4.10 Influência percentual dos percursos/manobras no dano acumulado virtual vertical.....	111
TABELA 4.11 Influência percentual dos percursos/manobras no dano acumulado virtual longitudinal.....	112
TABELA 4.12 Influência percentual dos percursos/manobras no dano acumulado virtual lateral.....	113
TABELA A1 Diferenças percentuais entre maiores e menores picos de cargas no projeto 1 no LDS	125
TABELA A2 Diferenças percentuais entre maiores e menores picos de cargas no projeto 2 no LDS	128
TABELA A3 Diferenças percentuais entre maiores e menores picos de cargas no projeto 3 no LDS	132
TABELA A4 Diferenças percentuais entre maiores e menores picos de cargas no projeto 4 no LDS	135

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

FCA	<i>Fiat Chrysler Automobiles</i>
CRF	<i>Centre Recherche Fiat</i>
vLRDA	<i>Virtual Road Load Data Aquisition</i>
LDS	<i>LATAM Durability Schedule</i>
EAC	Engenharia Assistida por Computador
CAE	<i>Computer Aided Enginnering</i>
FEA	<i>Finite Element Analysis</i>
MBS	<i>Multibody System Analysis</i>

NOMENCLATURAS

Letras Latinas

a	Ângulo do atuador
c_d	Velocidade de onda
C	Matriz de amortecimento
D	Dano
f	Função de série temporal
F	Força do atuador
g	Força da gravidade
G	Módulo de cisalhamento
i	Tempo total do sinal
k	Inclinação da curva de fadiga
K	Matriz de rigidez
L_{min}	Dimensão de elemento de malha
L	Espaço da série temporal
M	Matriz de massa
n	Número de repetições sinais e manobras
n_1	Número de ciclos
N_1	Número de ciclos
$N_{i,f}$	Número final de ciclos
NE	Número de ciclos ao limite de resistência
P	Força vertical constante atuador hidráulico
R	Vetor de força
S_1	Tensão
SE	Amplitude de carga
S_{max}	Limite de resistência à tração
t	tempo

T	Intervalo de tempo de série temporal
\ddot{U}	Vetor de aceleração
\dot{U}	Vetor de velocidade
U	Vetor de deslocamento

Letras Gregas

a	Comprimento da trinca
a_f	Comprimento final da trinca
α_R	Fator de amortecimento proporcional à massa
β_R	Fator de amortecimento proporcional à rigidez
λ	Primeira constante de <i>Lamé</i>
δ	Ângulo de mergulho do veículo
Δt	Intervalo de tempo
θ	Ângulo de rolagem do veículo
μ	Segunda constante de <i>Lamé</i> (Cisalhamento)
ξ_i	Fator de Amortecimento
ω_{\max}	Frequência angular do sistema
ω_i	Frequência particular

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo propor um bloco de fadiga virtual, que consiste em percursos e manobras virtuais e suas respectivas repetições, padronizado, para dimensionamento de componentes de chassis e carrocerias nas fases virtuais. Utilizando quatro projetos já consolidados, foram construídos seus respectivos modelos vRLDA (baseado em Elementos Finitos) para previsão de cargas em histórias temporais. Foram, além disso, utilizados percursos e manobras virtuais os quais representam melhor as provas de fadiga experimentais a banco e o LDS que avaliam a durabilidade de chassis e carrocerias respectivamente. A partir dos gráficos de Level Crossings resultantes das histórias temporais virtuais, foram comparadas as cargas resultantes nos centro das rodas, nas três direções principais do veículo, provenientes dos percursos virtuais e manobras estáticas com as cargas previstas nos ensaios experimentais. Após a validação da forma de passagem dos modelos virtuais, quanto à velocidade e percursos, foi elaborado um número de repetições para esses percursos e manobras estáticas virtuais de forma que o dano acumulado virtual fosse considerado equivalente com os previstos nas provas experimentais conforme critério adotado de equivalência de dano total. Os resultados dos comparativos de magnitudes de cargas verticais e longitudinais virtuais quando comparados com os resultados do LDS e provas em bancada longitudinais apresentam discrepâncias consideráveis devido às passagens no *PotHole*. Porém tais discrepâncias foram consideradas aceitáveis, principalmente pelo fato do LDS também resultar em cargas notadamente destoantes entre si (conforme abordado no Anexo A). Já para as cargas laterais, não houve diferenças como as outras duas direções anteriores. Por fim, calculado o número de repetições para cada manobra estática e percurso virtual, com o critério de dano equivalente adotado, o dano do bloco virtual acumulado respeitou os intervalos do critério depois de devidamente ajustado e desta forma considerado viável para avaliação da durabilidade virtual e veículos.

Palavras Chave: *Fadiga, Dano Acumulado, Elementos Finitos, durabilidade, Chassis, Carrocerias.*

1. INTRODUÇÃO

Durante o ciclo de desenvolvimento de um veículo, desde os primeiros conceitos até o produto final, as montadoras de automóveis são fortemente guiadas pela economia de tempo e recursos financeiros. Para isto, a redução do número de protótipos construídos se torna, não somente uma necessidade, mas também um grande desafio. Além disto, após a construção destes primeiros protótipos, é de extrema importância que estes tenham uma resposta adequada quanto ao desempenho estrutural a fim de reduzir testes experimentais e de longa duração e intervenções em componente falhos, **DUNI et al. (2010)** e **SCHRANK (2010)**.

A combinação de métodos numéricos aplicados à engenharia, como por exemplo, o Método dos Elementos Finitos e Multicorpos, e ferramentas computacionais cada vez mais rápidas e com poder de processamento cada vez maior se torna imprescindível, pois permite o desenvolvimento de novos procedimentos e metodologias de análises aplicadas ao projeto automotivo, capazes de fornecer respostas virtuais confiáveis e robustas, **DUNI et al. (2010)**, conseqüentemente, soluções de projetos mais eficientes.

Uma das particularidades mais importante do veículo é a sua durabilidade, ou seja, um automóvel não somente deve atender expectativas no cotidiano do cliente final, mas, principalmente, deve ser um produto durável e que mantenha suas características originais ao longo dos anos de utilização.

Conforme **DUNI et al. (2010)**, na FCA - Fiat Chrysler Automobiles, no ciclo de desenvolvimento da durabilidade do veículo para o dimensionamento de componentes e sistemas, são necessários dados de entrada em termos de aceleração e deslocamento do centro da roda. Porém estes dados são escassos e quase ausentes nas fases iniciais do projeto. Desta forma, considerações devem ser feitas baseadas em dados previamente conhecidos de testes físicos de veículos anteriores principalmente.

Diante de tal fato, para evitar incertezas originadas de dados de veículos anteriores e aprimorar as análises virtuais do ciclo de durabilidade, pesquisadores do Centro de Pesquisa Fiat (*CRF - Centro Ricerche Fiat*), empresa do grupo FCA, localizado em Torino Itália, desenvolveram uma metodologia, chamada de *vRLDA Virtual Road Load Data Aquisition* **vRLDA**, baseada em Elementos Finitos e Multicorpos, de geração de cargas através de um modelo virtual de veículo completo, capaz de simular a dinâmica

de um veículo passando sobre várias pistas de durabilidade padrão de testes digitalizadas, **DUNI** et al. (2008, 2010) e **PULEO** et al. (2011). Tal metodologia, como principal dado de saída, fornece a história temporal de forças provenientes da passagem em pistas de durabilidade pertencentes a um padrão de teste, em diversos pontos da suspensão e carroceria de um veículo, bem como as acelerações e deslocamentos.

Esta metodologia, conforme resultados de correlações obtidos ainda por **DUNI** et al. (2008, 2010) e **PULEO** et al. (2011), se mostrou bastante eficaz e consequentemente adotada no ciclo virtual de desenvolvimento da durabilidade dos projetos atuais da FCA Europa e América do Norte para geração de cargas para dimensionamento estrutural de componentes e sistemas de todo o projeto do automóvel.

Embora o desenvolvimento virtual do veículo conte com ferramentas robustas que proporcionam soluções ótimas, não há substituto para os testes experimentais em ambientes controlados com relação à durabilidade e confiabilidade do produto. Diante disto, cada montadora de automóveis possui suas metodologias e normas para testes físicos de fadiga acelerados, bem como locais específicos ou pistas próprias, que possibilitam a avaliação de durabilidade do seu produto.

O método de execução de provas de durabilidade sobre veículo da FCA é realizado de acordo com normas que possuem instruções específicas a fim de executar o teste físico de durabilidade acelerado que represente a vida do veículo. Estas normas são provenientes da harmonização de procedimentos de validação de durabilidade, feitos nos polos produtivos da FCA - América do Norte (mercado NAFTA) em seu campo de testes de Chelsea, Estados Unidos, e FCA – Europa (mercado EMEA) que possui o campo de teste de Balocco, Itália. Apesar destes campos de provas possuírem diferentes formas de passagens em pistas e diferentes percursos de durabilidade, a unificação da norma foi feita de forma a padronizar o número e a forma das passagens em cada pista, independente do campo de provas utilizado, e causar o mesmo dano acumulado no veículo sob avaliação, ou seja, se um veículo for submetido ao teste de durabilidade no campo de provas de Balocco, seguindo seu esquema de testes, terá o mesmo dano acumulado, ou muito próximo, se for realizado no campo de provas de Chelsea com seu esquema de testes.

No entanto, no polo produtivo da América do Sul (mercado LATAM), localizado em Betim – Brasil, a FCA não dispõe de um campo de provas de durabilidade próprio. De forma que as provas físicas de durabilidade de veículos são feitas em vias urbanas e vias

fora de estrada, as quais contemplam estradas de asfalto, calçamento de pedra e estrada de terra além de provas experimentais em bancadas de testes.

A metodologia experimental de ensaios de durabilidade em campo realizada pela FCA em Betim é denominada LDS (*LATAM Durability Schedule*). O percurso padrão do LDS foi elaborado com base em um conhecimento empírico e principalmente pelo histórico, de aproximadamente 25 a 30 anos, de queixas de clientes que relataram problemas em seus automóveis em determinados tipos de terrenos, locais e determinadas faixas de quilômetros. Todavia, vias públicas estão sujeitas a vários fatores, (agentes naturais ou agentes externos) que podem causar avarias no pavimento, além do próprio desgaste ao longo do tempo devido ao tráfego. Isto é mais evidenciado nos percursos de terra. Quando não há uma manutenção adequada, a pista provocará níveis de carregamentos diferentes para um mesmo veículo em diferentes passagens. Conseqüentemente, um eventual desvio padrão entre os resultados obtidos nas medições.

Há também a dificuldade de controle e obtenção de medições constantes durante os testes, pela impossibilidade de controlar imprevistos inerentes às vias públicas, como obstáculos, variações de velocidades bruscas por diversos motivos, dentre outras situações, as quais são praticamente inexistentes em um ambiente controlado como uma pista dentro de um campo de testes.

E por fim, a principal limitação da metodologia LDS é não ser capaz de representar devidamente os danos acumulados longitudinais e laterais dos componentes de chassi, pois não contempla provas específicas de acelerações e frenagens, sendo assim utilizada como teste principal para avaliação de durabilidade de componentes de carroceria pela sua severidade de cargas verticais.

Diante do exposto, além dos sinais do LDS verticais, para avaliação dos componentes de chassi, são realizadas provas físicas de durabilidade em bancadas de teste em componentes isolados ou partes montadas das suspensões. As cargas para execução destas provas são provenientes de cálculos analíticos (equilíbrio estático) do veículo, submetido a acelerações em arrancadas, frenagens e curvas, em seu peso máximo previsto a projeto, com os seus respectivos objetivos de vida à fadiga controlada por tensão, além dos sinais temporais do LDS ajustados provindos de projetos de veículos anteriores.

Da mesma forma, durante o desenvolvimento virtual dos projetos para o polo da América do Sul, por não ter um método unificado para previsão de carregamentos, a

FCA LATAM não dispõe de um método unificado para geração de cargas para o dimensionamento a fadiga na fase de desenvolvimento virtual dos componentes de todo o veículo. Para carrocerias, o dimensionamento a fadiga é feito com base em sinais de forças temporais experimentais (sinais do LDS) de carros já produzidos e ajustados para os projetos atuais, e para chassis, as simulações de durabilidade são feitas com blocos de fadiga cujas cargas são calculadas de forma analítica, juntamente, com os sinais verticais do LDS ajustados.

Portanto, não há um bloco de fadiga virtual padronizado representativo do mercado da América latina que possa ser utilizado para dimensionamento para chassis e carrocerias simultaneamente. Desta forma, o objetivo da presente dissertação será apresentado a seguir.

1.1 Objetivos

1.2.1 Objetivos Gerais

O objetivo desta dissertação é utilizando a metodologia vRLDA, criar um percurso virtual padrão com suas respectivas repetições, que possa ser utilizado em todos os projetos na fase virtual, para geração de cargas para dimensionamento a fadiga dos componentes de carroceria e chassis, que represente adequadamente o dano acumulado proveniente dos testes de durabilidade LDS dano vertical, e os ensaios em bancadas utilizados para avaliação dos componentes de chassis danos das cargas longitudinais e laterais.

1.2.2 Objetivos Específicos

Depois de construídos os modelos baseados na metodologia vRLDA de 4 projetos feitos e consolidados e que possuam as medições experimentais disponíveis para comparação. Os objetivos específicos são listados a seguir:

Objetivo específico 1: Por meio dos gráficos de *Level Crossings* resultantes das contagens de ciclos das histórias temporais, serão comparadas as magnitudes de cargas verticais resultantes das passagens dos modelos vRLDA com as cargas resultantes das provas experimentais do LDS. Da mesma forma, serão comparadas as magnitudes das cargas longitudinais e laterais com as provas a banco longitudinais e laterais.

Objetivo específico 2: Elaboração da primeira proposta de repetições de forma a se obter um bloco com os danos acumulados resultantes dos percursos e manobras virtuais isodanos as provas experimentais e comparativo da severidade deste bloco com as provas experimentais.

Objetivo específico 3: Ajuste final do bloco virtual de acordo com o critério de avaliação e comparação de dano acumulado adotado pela FCA.

Atingido tais objetivos, considera-se que a utilização da metodologia vRLDA se tornará viável para a predição de cargas para o desenvolvimento virtual a fadiga, tanto de peças pertencentes a carroceria quanto para chassi, que represente os ensaios físicos de durabilidade para o mercado LATAM.

1.2 Estrutura do Trabalho

O presente trabalho é estruturado em cinco capítulos distintos, sendo o primeiro deles a introdução a qual apresenta o problema, e a aplicabilidade da metodologia adotada para resolução deste problema e os objetivos da presente dissertação. No segundo capítulo é apresentada uma revisão bibliográfica abrangendo os seguintes temas: Métodos numéricos aplicados à engenharia e pesquisa, Métodos virtuais e experimentais de predição de cargas e reprodução de perfis de pistas, apresentação da metodologia de vRLDA, Acúmulo de danos e contagem de ciclos e os testes experimentais para avaliação de durabilidade. No terceiro capítulo é descrita a metodologia do trabalho a qual descreve o padrão de tratamento dos sinais virtuais e experimentais e cálculo do dano acumulado com o auxílio do software *Tecware*, descrição dos veículos utilizados no presente trabalho, descrição das provas LDS e a em bancadas de laboratório realizadas nestes veículos com seus resultados e por fim as pistas e manobras virtuais realizadas. No quarto capítulo são apresentados os resultados obtidos, além da discussão sobre os mesmos. Por fim, no quinto capítulo as conclusões são descritas seguidas dos trabalhos futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Métodos numéricos aplicados à engenharia e pesquisa

Métodos numéricos aliados à computação se tornaram, no decorrer dos anos, parte fundamental no desenvolvimento de um produto, seja na indústria automotiva, aeronáutica, naval, dentre outras. Segundo **ESSS** (2014, p.1)¹ a Engenharia Assistida por Computador (EAC), ou ainda CAE (do inglês: *Computer Aided Engineering*) permite que o projeto de componentes e sistemas mecânicos seja feitos com maior agilidade, custo financeiro menor sem comprometimento de qualidade. As ferramentas CAE podem ser utilizadas para diversos objetivos, como, auxílio na elaboração de projetos, validação de produtos, melhoria de produtos, investigação de falhas entre outras. Dentre alguns métodos utilizados na indústria, destacam-se: Análise por Elementos Finitos, Multicorpos, Fluidodinâmica Computacional.

Exemplo da importância dos métodos numéricos aplicados à engenharia, especialmente automotiva, é o trabalho de **BLUNDELL E HARTY** (2004), os quais apresentam uma abordagem que promove a união entre a clássica dinâmica veicular e a disciplina baseada em métodos computacionais conhecida como análise de sistemas Multi-corpos ou MBS (*Multibody System Analysis*). Em seu trabalho os autores afirmam que o método de análise dinâmica de mecanismos aliados a ferramentas computacionais se estabeleceu como um recurso para engenheiros de produto durante os anos 80, de forma similar ao que aconteceu com a tecnologia de análise em Elementos Finitos nos anos 70. Mais tarde, nos anos 90, se consolidou como parte do processo padrão de projeto e desenvolvimento da indústria automotiva, de forma que é inevitável que o engenheiro, que em seu cotidiano de trabalho lide com problemas envolvendo conforto e dirigibilidade (*handling*) de veículos, num ambiente automotivo moderno, utilizem o MBS para simular a dinâmica do veículo. O trabalho de **BLUNDELL E HARTY** (2004), ainda planeja promover ainda um estreitamento entre a simulação e os testes, indo além de prover técnicas de modelagem em MBS, mas também motivar uma significativa interpretação dos dados resultantes das simulações, no intuito de ajudar o engenheiro ou estudante, envolvido na área de dinâmica veicular, a entender estes resultados e aplicá-los de forma produtiva no desenvolvimento de veículos.

Como exemplo de um trabalho aplicado a melhoria de produto, **DOS ANJOS E MEDEIROS** (2017) executaram uma análise de Otimização Topológica em um suporte de motor aplicado em um veículo real para redução da massa distribuída no volume pré-estabelecido, restringindo-se a máxima tensão principal dado o caso mais severo de carregamento o qual o suporte é submetido. O resultado desta otimização, conforme figura 2.1, permitiu economia de material aplicado ao componente (aplicação de nervuras) sem comprometimento do desempenho estrutural.

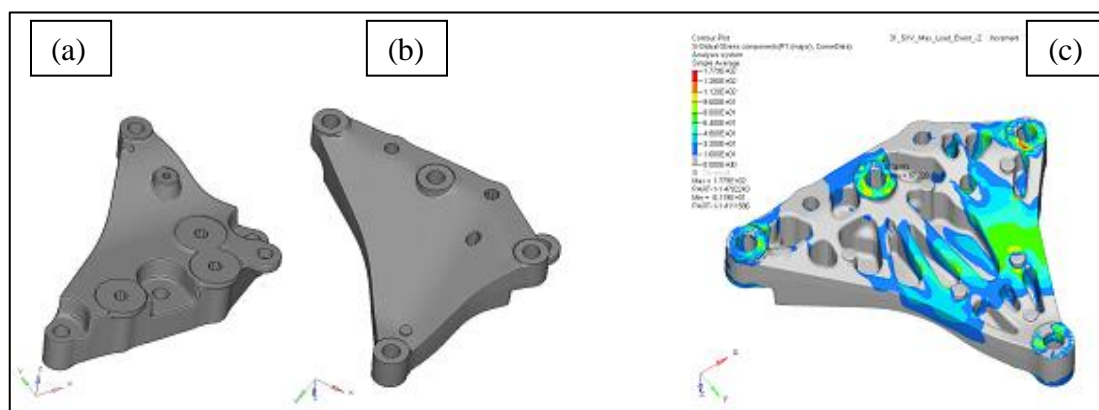


FIGURA 2.1 – Suporte de motor sob análise (a) Vista superior - (b) Vista inferior do volume máximo do suporte a ser “otimizado”, (c) Resultado de tensões do suporte *otimizado*.

FONTE: dos Anjos e Medeiros (2017)

SCHRANK (2010) aborda em seu trabalho, a necessidade atual das empresas do ramo automotivo de enfrentar os desafios como economia de combustível cada vez mais rigorosa, regulamento de redução de emissões, austera legislação de segurança, rápida mudança do comportamento dos clientes, demanda crescente por melhor desempenho e confiabilidade, dentre outros. Para este enfrentamento, o autor afirma que a simulação pode ser um catalizador chave para que as empresas encontrem melhores maneiras de projetar seus veículos a custos mais baixos. O autor ainda afirma que a crescente sofisticação dos softwares de simulação juntamente com as melhorias da computação de alto desempenho permite que este objetivo seja atingido, em vez de utilizar a simulação apenas para verificação de um projeto final ou para melhor entendimento dos problemas detectados durante a fase de testes físicos, uma abordagem baseada em simulação proporciona que o veículo virtual seja objeto de análises em todas as fases do projeto do automóvel. Para exemplificar seu ponto de vista, o autor cita o estado da arte nas áreas de simulação de *Crash and Safety, Noise Vibration and Harshness, Co-Simulation, Full*

Vehicle Durability, Optimizarion and Robust Design, Simulation Deployment to a Wider Audience.

As ferramentas CAE se tornaram poderosos recursos para o desenvolvimento técnico-científico. Várias pesquisas foram feitas no intuito de desenvolver novas metodologias, novos conceitos, trabalhos investigativos entre outros.

Para o mapeamento dos pontos críticos de tensões atuantes em uma barra estabilizadora de uma suspensão *Mc-Pherson*, **SANTOS** (1999) realizou uma análise em elementos finitos simulando a sollicitação da barra estabilizadora sobre o veículo em uma curva que gera um deslocamento assimétrico na suspensão equivalente a uma aceleração lateral de 0.7g. Com os resultados obtidos nesta análise, *strain gages* foram fixados nestes pontos críticos e a barra estabilizadora submetida a ensaios experimentais em laboratório, para posterior correlação com resultados provenientes de testes de durabilidade em vias públicas em vários pavimentos que representam a utilização do veículo pelo cliente. Os resultados encontrados apresentaram bom nível de correlação entre os testes em laboratório e dados coletados em vias públicas, demonstrando a importância do método dos elementos finito como ferramenta de suporte ao trabalho.

Com o mesmo intuito de **SANTOS** (1999), em seu trabalho de correlação de dano na carroceria entre ensaios experimentais de torção, feitos em laboratório, e testes de durabilidade de um veículo feitos em vias públicas em diversos tipos de pavimento, **PALMA E VIDAL** (2002), para encontrar os pontos críticos de concentração de tensões em pontos de solda na carroceria do veículo, realizou uma análise virtual através do FEA. A análise consistiu na aplicação de um torque de 200 kgm em um ponto de referência conforme figura 2.2:

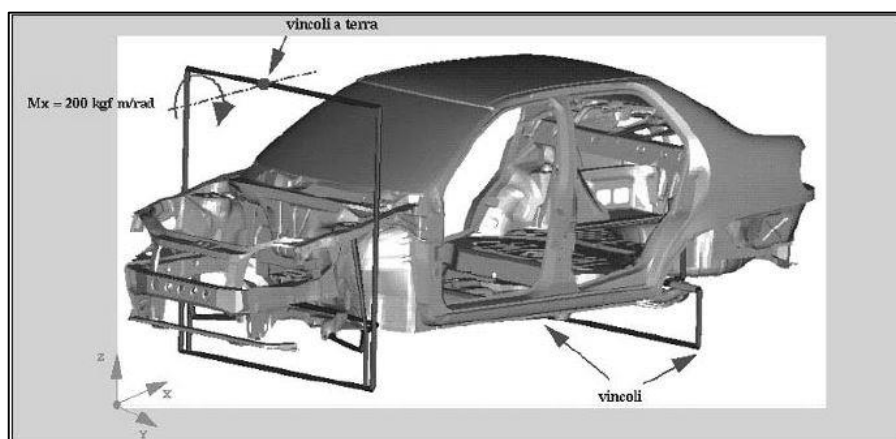


FIGURA 2.2 – Modelo FEA para ensaio de torção na carroceria
 FONTE: Palma e Vidal (2002)

Os resultados do trabalho reforçaram a importância da análise virtual de torção da carroceria, pois esta possibilitou a escolha das regiões adequadas para fixação das rosetas de deformação, e apresentaram boa correlação de deformações e tensões nestas regiões. Desta forma, uma das conclusões do trabalho foi a importância do método dos elementos finitos que se provou como uma importante ferramenta na validação do processo e dados experimentais.

O trabalho **ELS** et al. (2007) descreve três estudos realizados com modelos de 33 múltiplos corpos os quais apresentam resultados relativos a estabilidade, *handling* e conforto de veículos, sendo que no terceiro e último estudo, foi feito com um modelo mais detalhado construído em *ADAMS* (ferramenta de Multicorpos). Uma correlação foi feita para validar o modelo quanto a conforto, comparando os sinais obtidos em ambiente virtual e dados experimentais de velocidade de arfagem, deslocamento das molas e acelerações verticais. O mesmo modelo virtual também foi validado quanto a dirigibilidade, comparando os sinais obtidos em simulação com os dados físico de deslocamento das rodas, rolamento da carroceria, velocidade de guinada, aceleração lateral e velocidade do veículo em uma determinada manobra. Através dos resultados o autor conclui que uma suspensão passiva apresenta um compromisso entre conforto e dirigibilidade e que suas características caminham em sentidos opostos para melhorar os requerimentos de um ou outro.

LEAL (2007) através de simulações em Elementos Finitos avaliou a influência da forma do perfil de um eixo de torção nos parâmetros que influenciariam no comportamento dinâmico de um veículo focando nas variações de cambagem, convergência, bitola, além da altura de centro de rolagem. Durante o estudo, o modelo em Elementos Finitos foi comparado e correlacionado com os resultados experimentais obtidos em banco de testes, de deslocamento paralelo e oposto dos centros de roda. A seguir foram analisadas diversas modificações no perfil do eixo e sua influência nos parâmetros citados acima. Os resultados destas modificações possibilitam análises quanto à dinâmica do veículo para futuros projetos de eixos de torção que podem assumir diversas formas e características, dependendo do compromisso que se deseja no veículo.

Em seu trabalho, **CARVALHO** (2009) apresenta uma metodologia para avaliar o conforto do passageiro em um veículo utilizando modelagem numérica baseada em sistema de MultiCorpos. Foi desenvolvida uma série de estudos experimentais para

obtenção de parâmetros que pudessem balizar e referenciar os modelos numéricos. A partir destes resultados experimentais coletados nos passageiros, o modelo de MultiCorpos ajustado foi inserido num modelo de veículo completo e submetido à passagem sobre perfis de pista que serviram como fontes de excitação para avaliar as magnitudes de excitação globais que chegavam ao passageiro através do assento, definindo seu nível de conforto. O modelo proposto baseado na dinâmica de MultiCorpos se mostrou como uma solução multifuncional para representação do modelo discreto do passageiro, assim como simulando o comportamento cinemático do veículo.

2.2 Métodos Virtuais e Experimentais de predição de cargas e reprodução de Perfis de Pistas

Um dos grandes desafios que os engenheiros da indústria automotiva lidam no projeto do veículo é a predição das forças provenientes do contato pneu-pavimento que represente as condições mais severas de utilização do cliente final do automóvel, e que são necessárias em fases iniciais para o dimensionamento do veículo, para que objetivos de desempenho e confiabilidade sejam atingidos. Porém, as verdadeiras forças atuantes no carro estarão disponíveis apenas depois da conclusão do projeto quando na maioria das vezes os componentes, caso sofram modificações, impactarão em custos de tempo e financeiros bastante expressivos.

Por vários motivos, como a complexidade dos eventos que geram forças, modificações durante o andamento do projeto, estimativas de peso final do veículo, dentre outros, torna a predição acurada dos carregamentos que irão atuar na estrutura do veículo durante sua vida útil uma difícil tarefa. Neste sentido, a seguir, serão abordados alguns trabalhos relacionados a métodos de ensaios, físicos e virtuais, para a predição de cargas atuantes na estrutura do veículo.

Como exemplo específico da reprodução de perfis de pistas em laboratórios para testes de durabilidade, destaca-se o trabalho de **CHINDAMO** et al. (2017), o qual descreve uma metodologia de reprodução de perfis das pistas reais de asfalto, cascalho, calçamento e quebra molas, utilizando um *Four-Poster*, conforme imagem 2.3, em ambiente controlado de laboratório.

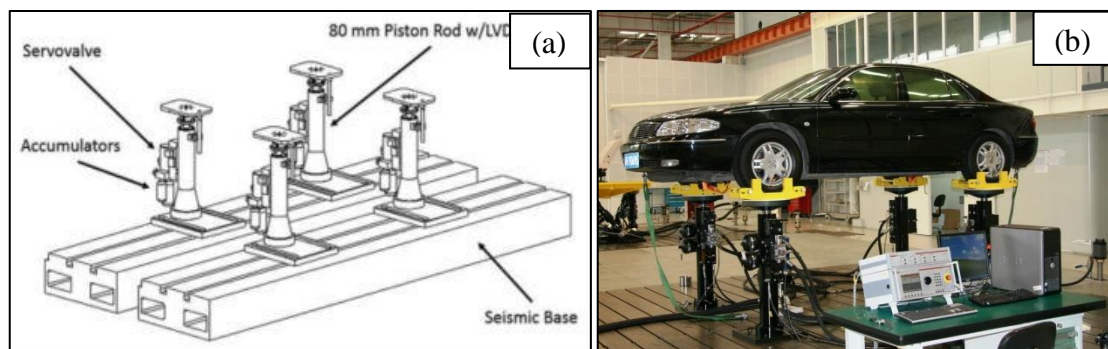


FIGURA 2.3 - (a) Esboço de um *Four-Poster* utilizado nos testes em laboratório, (b) Exemplo realde veículo submetido a teste no *Four-Poster*.

FONTE: (a) Chindamo et al (2017), (b) Google imagens.

Dados dos perfis de cada pista foram coletados através de acelerômetros e transdutores de curso instalados em cada roda do veículo, conforme relata em seu trabalho o autor através das figuras 2.4a e b, a seguir:

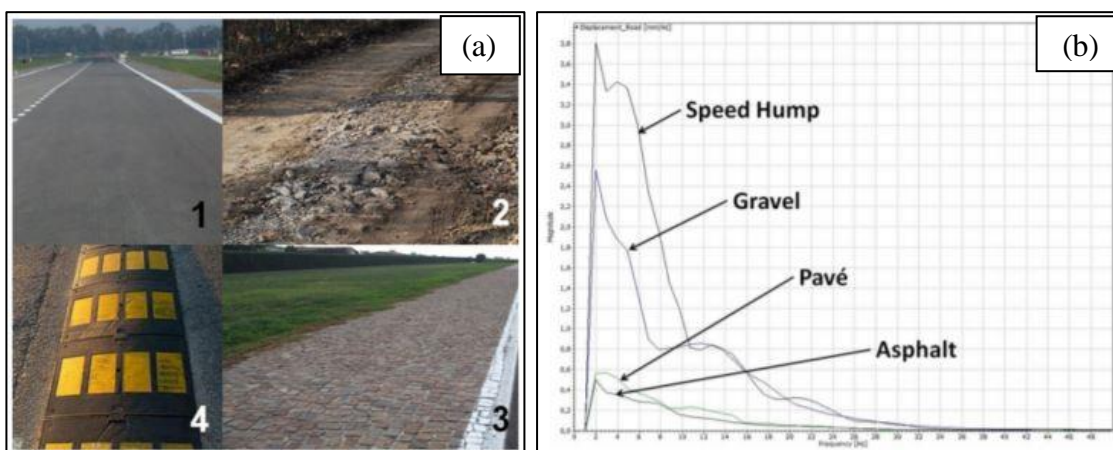


FIGURA 2.4 - (a) Perfis de pistas para coleta de dados - 1: *Asphalt* (Asfalto); 2: *Gravel* (Cascalho); 3: *Pave* (Calçamento); 4: *Speed Hump* (Quebra-molas), (b) Respectivas Respostas em frequência resultante das passagens em cada pista.

FONTE: Chindamo et al (2017).

Como resultado, **CHINDAMO** et al (2017) obteve, na comparação dos testes executados no *Four-Poster* com os dados coletados em campo, erros absolutos máximos, tanto nas acelerações quanto nos deslocamentos dos centro rodas medidos, em torno de 1% para todas os perfis reproduzidos, validando, sua metodologia de ensaio proposta

Conforme previamente mencionado, o avanço das ferramentas computacionais proporcionou o desenvolvimento de metodologias virtuais robustas. Exemplos são:

Em seu trabalho **SURENDRANATH** et al. (2011) utilizam a combinação das técnicas de simulação implícita e explícita em Elementos Finitos para prever o comportamento dinâmico de um veículo passando sobre uma pista de durabilidade virtual. Os autores ainda afirmam que este tipo de simulação é cada vez mais comumente utilizado no ciclo de desenvolvimento de durabilidade de projetos de veículos. Comumente, análises implícitas em Elementos Finitos são utilizadas para problemas que as respostas são lineares ou com pequenas não linearidades. Por outro lado, o método explícito de processamento é ideal para problemas com eventos de grandes não linearidades.

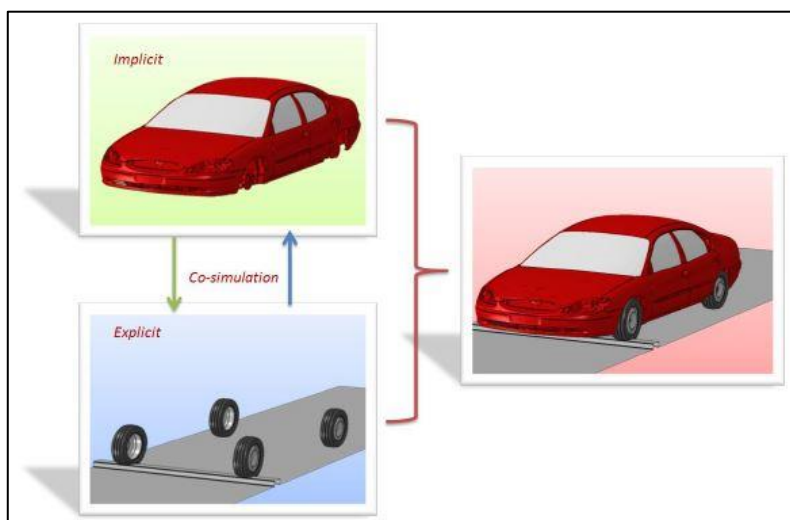


FIGURA 2.5 – Combinação das técnicas Implícita e Explícita aplicadas em um modelo de veículo completo passando sobre um obstáculo.

FONTE: Surendranath et al. (2011)

Desta forma, conforme figura 2.5, os autores propõem em seu trabalho que regiões do modelo que possuem comportamento moderadamente não linear ou inteiramente linear, como partes da carroceria e peças da suspensão, são resolvidas utilizando a formulação implícita, enquanto que regiões do modelo de grandes não linearidades, como impacto devido ao contato pneu pavimento, são resolvidos pelo algoritmo explícito. Como resultado, **SURENDRANATH** et al. (2011), além de prever forças no centro da roda e tensões atuantes em um componente de suspensão, demonstrou que a combinação das técnicas implícita e explícita implementada no modelo de veículo completo para durabilidade resultou em significativa economia de tempo sem perdas de precisão dos resultados quando comparado às respostas provenientes do mesmo modelo utilizando somente a técnica explícita.

MA (2013) em sua tese de doutorado afirma que a principal fonte de excitação é o terreno, sobre o qual o veículo responde desenvolvendo forças, momentos, etc. Diante disto as características do terreno influenciam o sistema de suspensão através dos pneus, de forma que a pesquisa da interação pneu-pavimento é a base para o fornecimento de estimativas confiáveis para encurtamento do desenvolvimento do veículo e redução de custos. O conhecimento do terreno deve ser então aplicado em conjunto com as características do pneu nas simulações dinâmicas, para estimativas precisas de cargas nas suspensões. Porém devido à complexidade do pneu, o custo computacional de uma análise dinâmica é bastante alto. Desta forma, ainda segundo o autor, o método que permite um ganho de tempo do processamento com aceitável perda de precisão dos resultados é a introdução de Perfil Eficaz de Pavimento ou ainda do inglês - *Effective Road Profile*. Esta técnica consiste na utilização de um modelo matemático de pneu simplificado submetido a excitações provenientes de um perfil de terreno filtrado capaz de reproduzir o terreno original. Logo, o autor desenvolve um perfil virtual de terreno pré-filtrado na tentativa de melhorar a eficiência de simulação computacional mantendo a precisão das forças extraídas do contato pneu-pavimento. Para isto, o autor desenvolve primeiramente um perfil virtual de pista baseado em nós, seguindo um padrão estocástico, que inclui as incertezas provenientes do perfil de pavimento utilizado como dados de entrada. Após isto, um modelo de pneu é então proposto para emular o seu deslocamento radial e as forças desenvolvidas da excitação provindas do perfil de pista criado. Após o modelo de pneu proposto devidamente validado, uma técnica de pré-filtragem é aplicada ao perfil de pista, baseada nas singularidades do modelo de pneu criado e validado. Como resultado, **MA** (2013) descreve uma melhoria de 1000 vezes o tempo computacional, além de 95% de nível de exatidão nas cargas resultantes do perfil pré-filtrado.

MO et al. (2000), descreve uma metodologia virtual para predição de cargas e análise de durabilidade da carroceria, utilizando um modelo de veículo simplificado em Elementos Finitos utilizando algoritmo explícito. Para isto, os autores submeteram o modelo do veículo conforme figura 2.6 a, a passagens em pista digitalizada, denominada *Pave Belga*, e extraíram a história temporal das forças resultantes nas suspensões transmitidas à carroceria, conforme mostra a figura 2.6 b.

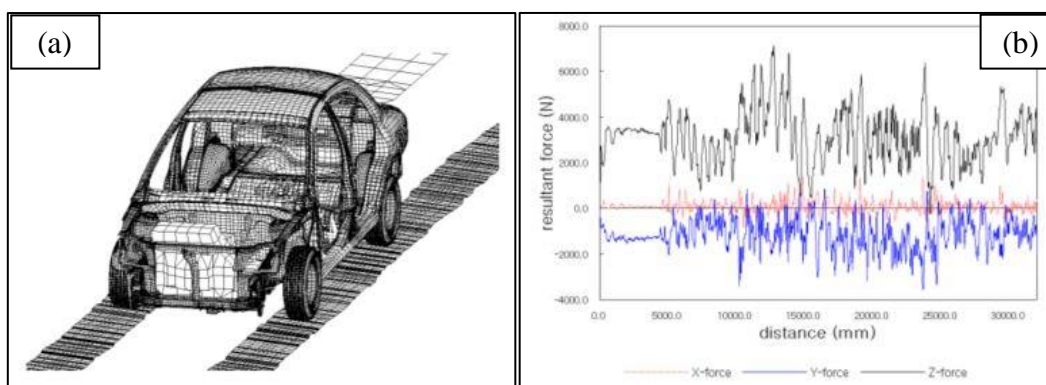


FIGURA 2.6 - (a) Veículo virtual sob teste (b) Resultado da história temporal de forças transmitidas a carroceria.

FONTE: Mo et al. (2000)

Para validar o seu modelo e método, **MO** et al. (2000) ainda comparou as acelerações em cada roda com dados experimentais, e alcançaram um bom nível de correlação, conforme mostra as figuras 2.7 a e b a seguir:

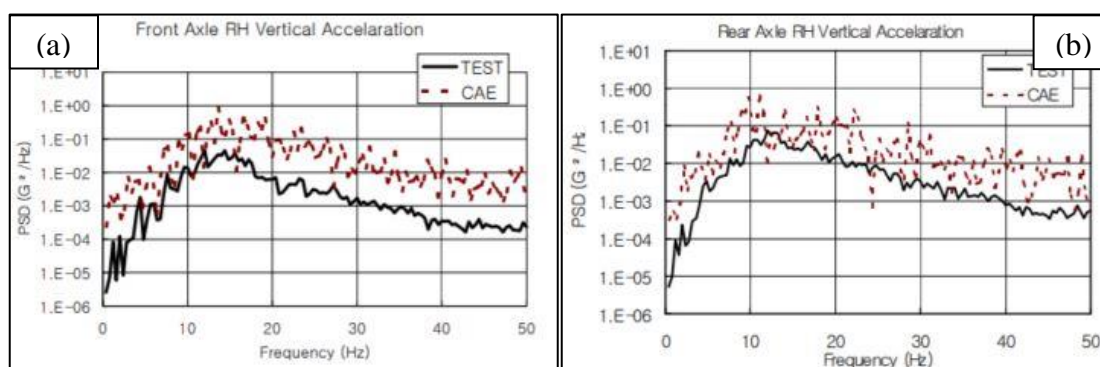


FIGURA 2.7 - (a) Resultado de PSD da aceleração vertical do eixo dianteiro, (b) Resultado de PSD da aceleração vertical do eixo traseiro.

FONTE: Mo et al. (2000)

E por último, os autores compararam os resultados de vida à fadiga avaliados virtualmente e experimentalmente, nas mesmas condições de prova, de diversos componentes, encontrando também bom nível de correlação. Desta forma o modelo e método mostraram-se adequados para predição de cargas e avaliação de durabilidade.

Semelhante ao trabalho de **MO** et al. (2000) e **SURENDRANATH** et al. (2011), engenheiros e pesquisadores da FCA e *CRF*, conforme já abordado na introdução, desenvolveram a metodologia de predição de cargas vRLDA, atualmente utilizada como padrão FCA e ferramenta básica utilizada para alcançar os objetivos do presente trabalho, que será detalhada no subitem a seguir.

2.3 Metodologia FCA - *Virtual Road Load Data Aquisition* (vRLDA)

No início dos anos de 2000, engenheiros e especialistas da área de durabilidade da FCA se depararam com a necessidade de melhorar o processo virtual de geração de cargas, torna-lo mais preciso, e avaliar modelos que representam o veículo como um todo, ao invés de somente componentes isolados como era feito até então. Desta forma, como relata **DUNI** et al. (2008, 2010), **PULEO** et al. (2011), foi criada uma metodologia baseada em elementos finitos a qual simula manobras e passagens de um veículo em pistas. A ideia geral do método é combinar o modelo de pneu com certo grau de complexidade com um modelo de veículo completo devidamente ajustado, e utilizar ambos os algoritmos implícito e explícito que o método dos elementos finitos dispõe, para conseguir prever em fases iniciais do projeto do automóvel as cargas transmitidas ao veículo percorrendo pistas de durabilidade digitalizadas que representam as pistas reais padrões de normas e presentes nos campos de durabilidade de Balocco e Chelsea. O objetivo da metodologia, conforme já mencionado, é representar o mais fielmente possível os teste físico de durabilidade feito em fase de protótipos de veículos, tornando-se a ferramenta padrão confiável para predição de cargas para projeto do veículo como um todo.

A figura 2.8 a seguir, apresenta o modelo vRLDA. O modelo é construído para cada projeto de veículo, tendo como premissas e informações de entrada: geometrias de suspensões, peso do veículo estimado, peso e inércia dos componentes de suspensão, pneus e rodas previstas, desenhos e características das buchas bem como a instalação do conjunto motopropulsor.

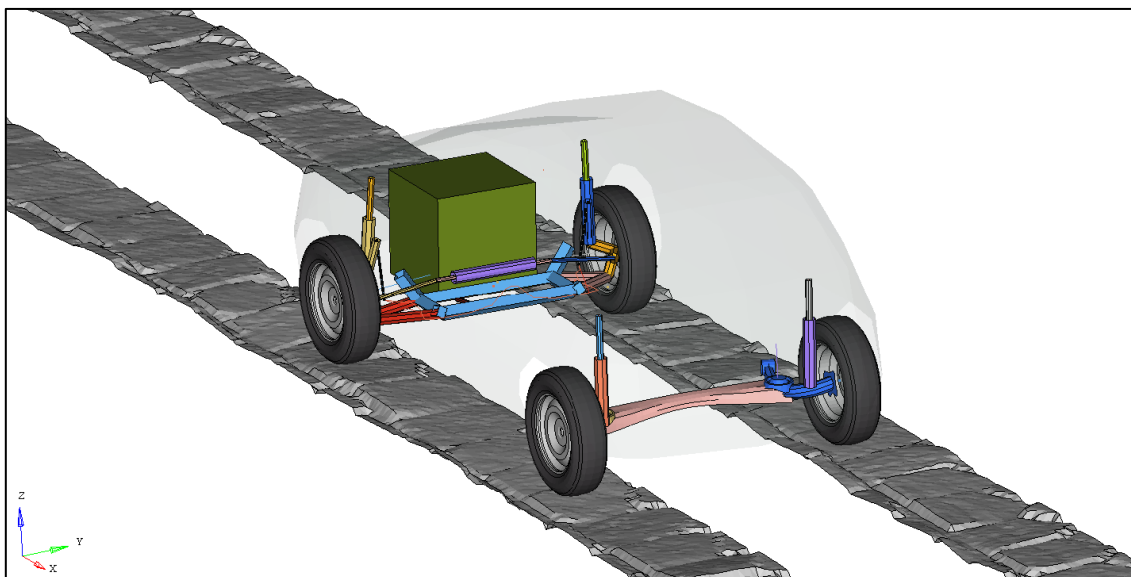


FIGURA 2.8 – Exemplo de um modelo vRLDA (virtual Road Load Data Aquisition)
 FONTE: Própria do autor

O modelo é constituído pelos subsistemas de suspensões traseira e dianteira, conjunto motopropulsor, caixa e tirantes da direção, barras estabilizadoras (quando aplicáveis) e carroceria. Cada componente destes subsistemas do veículo, como por exemplo, braços oscilantes, montantes, travessa da suspensão, são representados como corpos rígidos com um elemento 1D de massa concentrada e outro elemento 1D com o tensor de inércia localizados no centro de gravidade do componente. Na ligação entre tais componentes, para representação das buchas, há elementos 1D específicos que contêm as rigidezes estáticas nas 3 direções principais do veículo e os coeficientes de amortecimento estáticos. Para o caso específico de carros que tenham eixo de torção como tipologia para suspensão traseira (vide figura 8), o corpo rígido que representaria a trave central é substituído por um eixo com elementos 2D flexíveis. Da mesma forma, as barras estabilizadoras sofrem esta adaptação quando são aplicáveis, porém são modelada com elementos 1D. A representação das molas e amortecedores, é feita por meio de elementos 1D, que para o caso da mola, há a propriedade específica para rigidez com a força de reação em função do deslocamento do elemento, e para o caso do amortecedor, a força de reação em função da velocidade de deslocamento do elemento. A figura 2.9 a seguir mostra um exemplo de uma suspensão dianteira *Mc-Pherson* modelada conforme metodologia vRLDA. A carroceria e o conjunto motopropulsor são representados como elementos de casca rígidas genéricas, que têm um elemento central 1D de referência que contém propriedades de massa e tensor de inércia da carroceria sem partes móveis e acabamentos (do inglês *Body White*), motor, câmbio e periféricos

respectivamente. O controle de direção, aceleração e frenagem do modelo durante as manobras nas pistas digitalizadas, são feitos com algoritmos específicos feitos em *Python*, que rodam simultaneamente com o software *Abaqus* responsável pelo processamento do modelo.

Os desenvolvimentos dos modelos de pneu e pistas virtuais serão detalhados nas seções seguintes, já que foram dois dos principais desafios na criação da metodologia. **DUNI** et al. (2003, 2008, 2010) e **PULEO** et al. (2011) mostra nestes vários trabalhos relativos a metodologia vRLDA que a maneira mais viável para o procedimento completo de passagem do modelo do veículo em pistas digitalizadas de acordo com a metodologia vRLDA, que principalmente economize tempo de processamento e resulte em respostas confiáveis, consiste em duas análises distintas, que mesclam as respostas dos algoritmos implícito e explícito. Após a construção do modelo em elementos finitos conforme descrito anteriormente, há uma primeira análise dividida em quatro passos que visa encontrar o equilíbrio estático do modelo como um todo, utilizando o algoritmo implícito:

Passo 1: aplicação das cargas e o conseqüente pré-carregamento das suspensões (pré cargas das molas e amortecedores). As cargas aplicadas ao veículo correspondem à configuração padrão do veículo a projeto (incluem passageiros e peso da bagagem);

Passo 2: o assento dos quatro pneus e o inflamento, feito através da aplicação de uma força distribuída na superfície interna do pneu que simula o ar;

Passo 3: a aplicação de contato, tipo de interação entre componentes inerente ao método dos elementos finitos, entre as rodas e a malha do pavimento;

Passo 4: o equilíbrio entre o veículo e o solo sob o campo de gravidade aplicado no passo anterior, obtido removendo todas as condições de contorno aplicadas nas partes do veículo, ou seja, equilíbrio do modelo do veículo sobre seu peso próprio distribuindo o peso por eixo correspondente.

Somente após essa primeira análise, os resultados do equilíbrio estático são importados para a segunda análise que corresponde à passagem propriamente dita pelos obstáculos e perfis de pistas digitalizadas utilizando o algoritmo explícito dos elementos finitos.

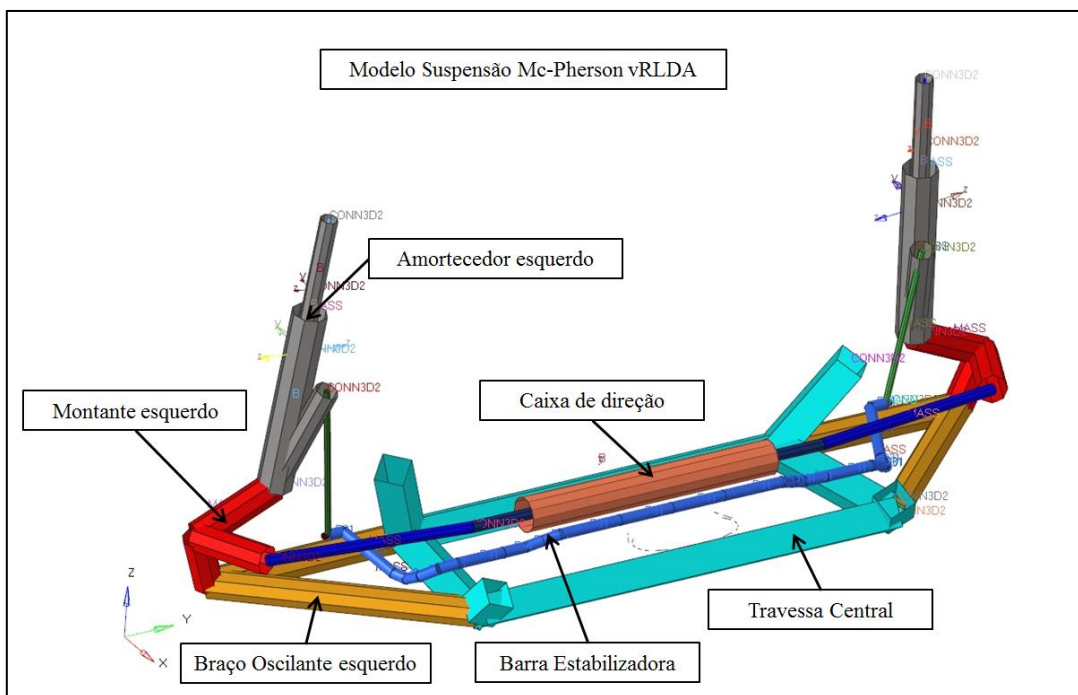


FIGURA 2.9 – Exemplo de um modelo de suspensão *Mc-Pherson* modelada no vRLDA
 FONTE: Própria do autor

Segundo **DUNI** et al. (2008, 2010), **PULEO** et al. (2011), dentre os principais desafios relativos à ferramenta numérica de elementos finitos para o desenvolvimento desta metodologia destacaram-se:

- A escolha da melhor estratégia para combinar a simulação quase-estática (equilíbrio estático do modelo) e dinâmica (a interação pneu pavimento).
- O desenvolvimento de um modelo de pneu confiável em elementos finitos com complexidade moderada.
- Digitalização de pistas reais de durabilidade do campo de provas de Balocco e sua discretização adequada para ser viável a utilização em elementos finitos.

2.3.1 Escolha adequada dos algoritmos em elementos finitos

Apenas no intuito de ressaltar como consideração geral, conforme **ALMACINHA** (1985), uma análise dinâmica é diferente da correspondente análise estática em dois principais aspectos. O primeiro, a variação do problema dinâmico com o tempo, visto que as ações atuantes bem como as respostas do problema variam com o tempo. Desta forma, naturalmente, o problema dinâmico não tem uma solução única como acontece

no estático. Assim, a análise dinâmica deve ser tratada estabelecendo uma sucessão de soluções correspondentes a todos os instantes de tempo de interesse da resposta. O segundo aspecto, consiste na consideração das forças inerciais que se opõem às acelerações provocadas pela aplicação de forças dinâmicas.

Segundo **DUNI** et al. (2008, 2010), **PULEO** et al. (2011), na tentativa de descobrir qual método é o mais adequado para executar e representar os fenômenos dinâmicos transientes, causados principalmente pelo contato do pneu com o pavimento e transmissão das forças de reação no pneu para o restante do veículo, foi o mais vantajoso utilizar os diferentes operadores, implícito ou explícito relativos ao método dos elementos finitos, para integrar a resposta dos fenômenos envolvidos. A utilização da combinação de ambos os operadores se mostrou a mais apropriada na metodologia vRLDA, já que o software utilizado *Abaqus* permite que o resultado de uma análise implícita seja importada para a análise explícita.

Relativo ao método dos elementos finitos, de acordo com **BATHE** (1982), a equação de equilíbrio que governa um sistema, em elementos finitos, não linear dinâmico é:

$$M\ddot{U} + C\dot{U} + KU = R \quad (2.1)$$

Onde M , C e K são as matrizes de massa, amortecimento e rigidez respectivamente e R o vetor de força. \ddot{U} , \dot{U} e U são aceleração, velocidade e deslocamento. Os procedimentos de interação utilizados para a solução desses sistemas gerais não lineares de equações diferenciais podem ser divididos em: Integração Direta e Superposição de modos.

Na Integração Direta, o qual é o método mais comum, procedimento passo-a-passo é usado para resolver a equação 2.1. A aplicação deste método é baseada em duas ideias:

- tentar satisfazer a Equação 2.1 apenas em intervalos de tempo discretos Δt , em vez de em qualquer momento t , ou seja, subdividir a análise em vários Δt ;
- assumir a variação dos deslocamentos, velocidades e acelerações dentro de cada intervalo de tempo Δt . Obviamente, o critério de escolha sobre essa suposição determina a precisão, estabilidade e custo de tempo do procedimento.

Ou seja, na solução de problemas utilizando a Integração Direta, a escolha fica entre o uso do integrador de tempo explícito ou implícito.

2.3.1.1 Método Explícito

Segundo **BATHE** (1982), também conhecido como método de Diferença Central, a solução de equilíbrio de deslocamento no tempo $t + \Delta t$ é baseada na utilização das condições de equilíbrio no tempo t . Tal esquema de integração não requer uma fatoração da matriz de rigidez na solução passo-a-passo (*step-by-step*) que pode ser levada a cabo no nível do elemento. Uma segunda consideração muito importante no uso do esquema de Diferença Central é que este requer que o passo de tempo Δt seja menor que um valor crítico, $\Delta t_{critico}$, que pode ser calculado a partir das propriedades de massa e rigidez de todo o modelo. Mais especificamente, para obter uma solução válida (para o caso sem amortecimento), conforme equação 2.2:

$$\Delta t \leq \Delta t_{critico} = \frac{2}{\omega_{max}} \quad (2.2)$$

Onde ω_{max} é a maior frequência do modelo com “n” graus de liberdade. Uma aproximação do limite de estabilidade é descrita como o menor tempo de deslocamento de uma onda de dilatação em qualquer um dos elementos da malha do modelo, conforme equação 2.3:

$$\Delta t_{critico} \approx \frac{L_{min}}{c_d} \quad (2.3)$$

Onde L_{min} é a menor dimensão de elemento na malha e c_d é a velocidade de onda de dilatação em termos das constantes efetivas de Lamé, λ e $G = 2\mu$.

Todos os esquemas de integração que requerem o uso de um intervalo de tempo Δt menor que um passo de tempo crítico $\Delta t_{critico}$, como o método de Diferença Central, é considerado condicionalmente estável. Se for usado um intervalo de tempo maior que $\Delta t_{critico}$, a integração é instável. Isso significa que quaisquer erros resultantes da integração numérica ou arredondamento numérico cresce e tornam resultados dos cálculos (resultados não confiáveis ou algumas vezes até completamente errados) não confiáveis. Como é possível ver na equação 2.3, o $\Delta t_{critico}$ é diretamente proporcional ao tamanho mínimo de elemento da malha do modelo, desta forma deve-se encontrar um compromisso entre custo de tempo da análise e precisão. É indicado particularmente

para simulações numéricas de fenômenos dinâmicos. Uma desvantagem do integrador explícito é que não é possível aplica-lo em simulações de fenômenos estáticos.

2.3.1.2 Método Implícito

Conforme **BATHE** (1982), o integrador implícito utiliza as condições de equilíbrio no tempo $t + \Delta t$ para encontrar a solução do campo de deslocamento ao mesmo tempo. Isso significa que utilizando expressões de diferenças finitas padrões, para aproximar as componentes de aceleração e velocidade em termos de componentes de deslocamento, a solução para o campo de deslocamento no tempo $t + \Delta t$, ${}^{t+\Delta t}U$, pode ser obtida a partir da seguinte equação de equilíbrio 2.4:

$$M {}^{t+\Delta t}\ddot{U} + C {}^{t+\Delta t}\dot{U} + K {}^{t+\Delta t}U = {}^{t+\Delta t}R \quad (2.4)$$

A eficiência deste esquema de integração é devida ao fato de que para que a precisão da integração seja atingida, o passo de tempo Δt pode ser escolhido sem qualquer pré-requisito (como o da equação 2.3), e em muitos casos Δt pode ser muito maior que o $\Delta t_{critico}$ conforme equação 2.3. Uma grande vantagem do esquema de solução passo-a-passo com base no método implícito de integração é que ele pode ser usado para resolver problemas estáticos e dinâmicos, enquanto o método de diferença central solução (explícita) não pode ser usado se o efeito de massa e amortecimento for negligenciado.

2.3.2 Modelo de pneu

Conforme **DUNI** et al. (2003), ao lidar com os problemas dinâmicos numéricos em relação a um veículo passando sobre um obstáculo usando uma abordagem de elementos finitos que inclui o perfil da estrada, a questão mais crítica foi relacionada à construção de um modelo apropriado em elementos finitos do pneu capaz de transmitir cargas dinâmicas transientes ao cubo. Fabricantes de pneus comumente usam, no estágio de desenvolvimento de seus produtos, modelos FEM detalhados que têm um custo computacional excessivo em um ambiente de veículo completo. Portanto, para a metodologia vRLDA, foi necessário desenvolver um modelo FEM de uso geral com um

número restrito de graus e liberdade (em todo caso, muito maior do que um modelo Multicorpos utilizados para análises de dinâmica veicular principalmente), conforme exemplo da figura 2.10, tendo como principal objetivo descrever a resposta dinâmica do pneu em condições gerais, e não ser usado como projeto de pneus.

A figura 2.10 mostra dois exemplos de modelos de pneus utilizados, sendo que o modelo *Pirelli* 2.10 (a) foi um dos primeiros e o *MF-Swift* 2.10 (b) um dos mais utilizados em análises Multicorpos. O modelo *Pirelli*, que de acordo com **CRF** (2009), é um modelo 2D de 4 graus de liberdade onde o pneu é representado por um anel rígido conectado ao aro por rigidez e amortecedores simulando as características de carcaça. Uma mola vertical conecta o solo ao anel, simulando as grandes deformações na região de contato. Um modelo de deslizamento linear longitudinal de primeira ordem também está incluído. O modelo *MF-Swift* 2.10 (b), um pouco mais complexo, tem um anel rígido elasticamente suspenso, um modelo de contato específico com o pavimento, um modelo de envolvimento de obstáculos e um modelo de deslizamento em estado estacionário (fórmula mágica).

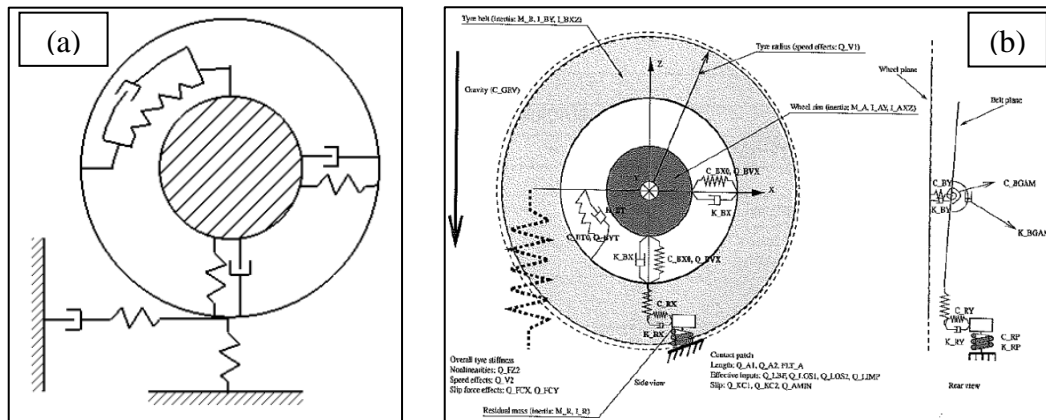


FIGURA 2.10 – Exemplo de modelos de Pneus Multicorpos (a) modelo *Pirelli*; (b) modelo *MF-Swift*
 t de pneu vista lateral e posterior
 FONTE: CRF (2009)

2.3.2.1 Modelo de pneu vRLDA

Para a construção do primeiro modelo de pneu em elementos finitos adequado para o vRLDA conforme mostra a figura 2.11 um exemplo, e posterior replicação desse método de construção a outros modelos de pneu, **DUNI** et al. (2003) se baseou

primeiramente em um pneu real com dimensões 165/65 aplicado em um carro de produção devido ao fato do comportamento deste pneu já ser bem conhecido, ou seja, havia certa quantidade de informações experimentais e virtuais quanto ao comportamento deste pneu disponíveis. Para a construção e validação do modelo, o autor seguiu três passos descritos nos tópicos a seguir.

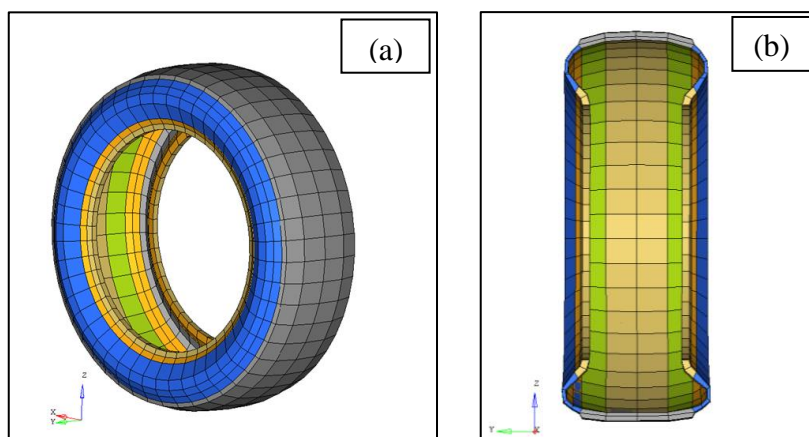


FIGURA 2.11 – Exemplo de um modelo de Pneu vRLDA – (a) Malha do modelo FEM vRLDA do pneu; (b) – Vista em corte da malha do pneu
 FONTE: Própria do autor.

2.3.2.2 Validação estática e modal do pneu vRLDA

DUNI et al.(2003) relata que o processo de validação estática do pneu sob estudo consistiu na calibração do comportamento da borracha e da espessura dos elementos de membrana, como pode ser visto na figura 2.11b, com base nos dados, geralmente disponíveis no estágio inicial de desenvolvimento de um carro novo: peso, rigidez vertical e lateral. Para realizar a validação estática do modelo, foi utilizado o código Implícito com o procedimento passo-a-passo. O procedimento numérico pode ser resumido em quatro etapas:

Etapa 1 – Assentamento do pneu no aro da roda, realizado movendo os nós do pneu de interface com o aro da roda para a posição de montagem, conforme o componente real.

Etapa 2 – Inflamento do pneu, aplicando uma carga distribuída na superfície interna das lonas do pneu simulando o comportamento do ar dentro do pneu.

Etapa 3 - Aplicação inicial da interação de contato do pneu no solo e depois o carregamento efetivo da roda nas condições de teste físico.

Etapa 4 – Com a condição da roda carregada previamente obtida, foi feita uma análise modal. O aro foi completamente fixado no chão exceto para o grau de liberdade de rotação ao redor do eixo da roda.

Os resultados virtuais, em relação aos experimentais, demonstraram boa concordância em termos de rigidez radial e as três primeiras frequências naturais. Os valores das três primeiras frequências naturais do modelo numérico apresentaram variações de 6.9% a mais, 0.8% para menos, e 4.0% para menos, em relação aos dados experimentais respectivamente.

2.3.2.3 Validação quase estática do pneu vRLDA

O teste físico é realizado em uma superfície de aço plana longa em que o pneu montado na roda é apoiado com determinada carga. Os graus de liberdade do conjunto pneu roda são restritos nas três principais direções com exceção do de rotação ao longo do eixo da roda. A pista é então deslocada em relação ao pneu com velocidade baixa para não haja excitação dinâmica do pneu. Para o pneu considerado, foi feito um obstáculo retangular com dimensões de 25x100mm. O teste virtual foi feito considerando as condições de finais encontradas na etapa três da validação estática (tópico anterior), que representa as condições de equilíbrio do pneu na presença de uma carga vertical constante de 312 kg. Feita a simulação, a validação do modelo é realizada em termos de variações de carga vertical e longitudinal e raio de rolamento em relação à distância longitudinal entre a roda e o centro do obstáculo (a distância zero significa que o centro da roda coincide com o centro do obstáculo). Como resultado, em termos de raio de rolamento e variações longitudinais de carga, o autor relata que com os ajustes no modelo numérico (substituição para malha sólida com material de borracha nas laterais do pneu) houve uma boa correlação entre resultados numéricos e experimentais. Houve pequenas variações entre virtual e experimental nos picos e variações na carga vertical.

2.3.2.4 Validação Dinâmica do pneu vRLDA

Segundo **DUNI et al. (2003)**, o teste experimental foi executado em cima de um tambor de 2,5 m de diâmetro, o qual gira em torno do seu eixo longitudinal com o pneu apoiado sobre ele, e é projetado para medir o comportamento dinâmico do pneu na faixa de

frequência de 0 a 100 Hz. A altura vertical do eixo da roda pode ser ajustada para carregar o pneu enquanto durante os experimentos os movimentos vertical, longitudinal e lateral do eixo da roda são restringidos. A reação às forças do pneu, longitudinal e vertical, são medidas. Cabe ressaltar que em um primeiro momento, os resultados da validação dinâmica foram comparados com os resultados obtidos por um modelo de pneu multicorpos *MS-Swift*, semelhante ao da figura 2.10 b, já correlacionado com dados experimentais e utilizado previamente para outras análises.

A simulação numérica da manobra dinâmica de rolamento de pneus foi realizada com o algoritmo explícito do software *Abaqus*. Neste caso, um perfil de estrada plano com um obstáculo retangular de dimensões 25x100mm a uma determinada distância do veículo foi utilizado ao invés do tambor de teste de bancada. As condições iniciais para essa análise explícita foram importadas (usando o recurso de Importação do código *Abaqus*) do último incremento de carregamento estático (etapa três da validação estática do pneu) realizado anteriormente no *Abaqus* no implícito. Nessa simulação, o carro permanece estático e a pista é deslocada longitudinalmente em relação ao veículo, de forma que no nó de referência da malha da estrada, modelada como um corpo rígido é aplicado uma condição de contorno do tipo velocidade, enquanto que os outros graus de liberdade são restritos. As simulações foram realizadas na velocidade de 40 km/h com a altura do eixo correspondente à carga vertical inicial de 312 kg. Diferentes simulações numéricas foram realizadas com o objetivo de investigar a influência dos seguintes parâmetros no comportamento dinâmico dos pneus sobre o obstáculo: as dimensões dos elementos da malha do pneu, o amortecimento dos materiais aplicados e as propriedades de contato.

Em relação ao amortecimento, foi introduzido um efeito geral de amortecimento de Rayleigh.

Segundo **COOK**, (2002) para um determinado modo de vibração i , alto, a viscosidade do material age de modo a amortecer o movimento relativo dos graus de liberdade, e seu efeito aumenta a medida com que a frequência ω_i aumenta. Neste caso, a fração de amortecimento crítico ξ_i , para uma frequência particular ω_i , pode ser definida pela seguinte expressão:

$$\xi_i = \frac{\alpha_R}{2\omega_i} + \frac{\beta_R \omega_i}{2} \quad (2.5)$$

Na equação 2.5, o fator α_R introduz uma força de amortecimento proporcional à massa e o fator β_R introduz um amortecimento proporcional à rigidez do material elástico, e ambos os fatores são medidos experimentalmente.

Como resultados, **DUNI** et al. (2003) fez algumas considerações em relação ao resultados A primeira foi que, para amortecimento baseado apenas no amortecimento proporcional da massa, com fator α_R calibrado para 1ª frequência plana e definido para diferentes frações de amortecimento crítico variando de 2% a 7%, nenhuma mudança significativa na resposta dinâmica do pneu foi verificada, bem como quando se adotou um tamanho de elementos da malha menor. Para $\xi_i > 9\%$ em vez disso, a resposta do pneu, variou drasticamente.

Quando adicionado amortecimento proporcional à rigidez, com fator β_R calibrado para a 3ª frequência natural $f = 87$ Hz e $\xi_i = 5\%$, nenhuma mudança significativa na resposta dinâmica do pneu foi verificada, porém o tempo total da análise aumentou significativamente.

Houve um comportamento bastante semelhante na variação da força vertical do modelo Multicorpos e elementos finitos. Além disso, o valor do pico de força vertical obtido pela simulação de elementos finitos foi no máximo de 8% menor que o modelo Multicorpos.

Após essa primeira comparação com um modelo Multicorpos, realizou uma análise comparando as cargas resultantes no centro da roda, devido a um obstáculo de buraco (chamado em inglês de *PotHole*), com resultados experimentais. O obstáculo de buraco, que tem um comprimento de 2700 mm e uma profundidade e altura de 114 mm, é comumente usado pelos fabricantes de automóveis para avaliação estrutural de componentes de suspensão. O teste experimental foi realizado a uma velocidade de 40 km/h e apenas as rodas do lado esquerdo passam por cima do obstáculo, enquanto as rodas do lado direito rodam numa estrada plana. Após a replicação do buraco em ambiente virtual, o autor conclui que obteve boa concordância entre os valores de pico de carga no centro da roda medidos quando comparados a resultados experimentais e modelo Multicorpos realizados.

De forma geral, a conclusão final de **DUNI** et al. (2003), é que uma análise de sensibilidade do tamanho da malha, técnica de modelagem adotada e fator de amortecimento na resposta do pneu 165/65 sobre o obstáculo foi realizada. O processo de validação do pneu foi composto por uma avaliação estática, quase estática e dinâmica, no qual o resultado numérico do modelo proposto, expresso em termos de

carga vertical e longitudinal e raio de rolamento, quando comparados com dados experimentais e Multicorpos, se mostrou adequada e aplicada com sucesso.

2.3.3 Digitalização das pistas

Conforme PULEO et al. (2011), cada fabricante de automóveis possui suas próprias instalações e objetivos para avaliações de durabilidade que geralmente são baseadas em pistas de referência que representam todas as condições de uso durante a vida do veículo. A FCA, no campo de provas de *Balocco*, possui duas pistas principais de referência:

- *Pave Belga*, pista de calçamento com 400 metros de comprimento, utilizada para carros de passageiros;
- *Mandria*, pista com 900 metros de comprimento, utilizada para veículos comerciais.

Com o intuito de simular as condições reais de teste em ambiente virtual pela metodologia vRLDA, uma descrição numérica das pistas foi feita por meio de medições óticas (scanner 3D), conforme mostra a figura 2.12. O resultado dessas medições foram grades com coordenadas verticais com resolução de 5.5mm no espaço horizontal.

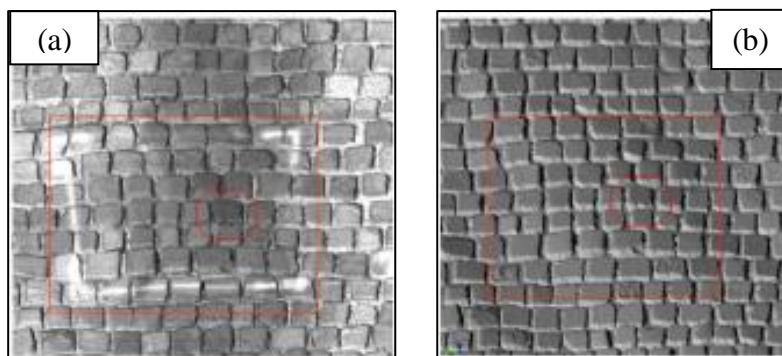


FIGURA 2.12 – (a) Resultado do escaneamento do trecho de pista Pave com textura; (b) Resultado do mesmo trecho sem textura (mais nítido).
FONTE: Puleo (2011)

Essas medições do *Pave Belga* e de outras pistas, foram feitas e efetuadas no software *Abaqus* que formam a malha da pista com elementos rígidos. A malha consiste em duas faixas com comprimentos suficientes para cobrir a passagem dos pneus de cada lado do veículo, como mostra a figura 2.13 a seguir:

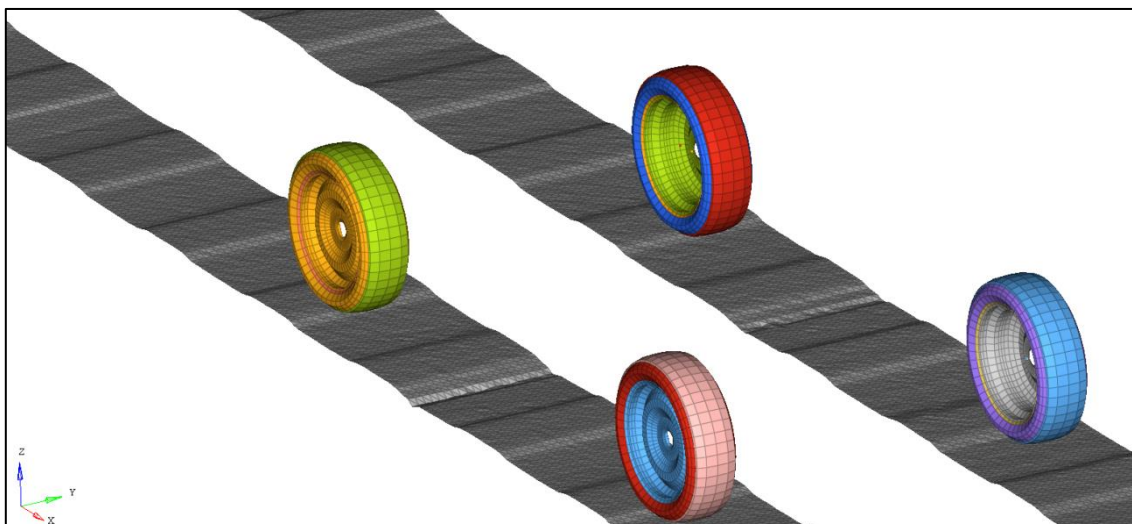


FIGURA 2.13 – Malha da pista com elementos rígidos utilizada no vRLDA
 FONTE: Própria do autor

Ainda conforme **PULEO** et al. (2010), era uma prática utilizar um método Lagrangeano puro, com o *Abaqus* Explícito, para realizar as manobra e passagens por obstáculos. Para reduzir o tempo de cálculo, a análise é dividida em várias etapas, ou seja, o comprimento total da pista é dividido em vários trechos de forma com que o algoritmo do *Abaqus* tenha que lidar com número menor de elementos totais no modelo.

Na tentativa de se diminuir ainda mais o tempo de processamento da análise mantendo a sua precisão, uma alternativa para o método Lagrangeano puro, foi desenvolver formulação Euleriana e focar a atenção no movimento da estrada através de um volume de controle estacionário. Essa nova formulação, em vez de usar elementos rígidos, utiliza a malha da pista deformável e modelada como um rolo fechado, cujos nós são restringidos com uma amplitude apropriada de deslocamentos verticais e velocidade de passagem, a fim de fazer um movimento circular do rolo, e reproduzir o perfil da pista, como mostra o esquema da figura 2.14 e modelo vRLDA nesta abordagem na figura 2.15.

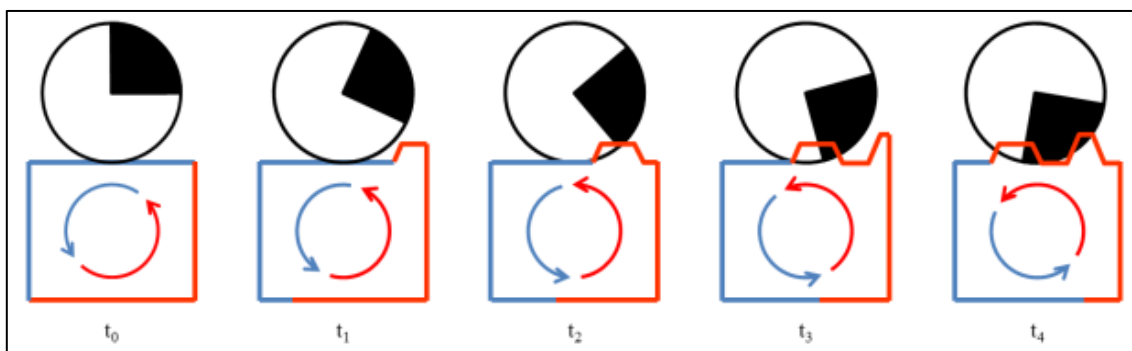


FIGURA 2.14 – Esquema da formulação Euleriana da pista digitalizada
 FONTE: Puleo (2011)

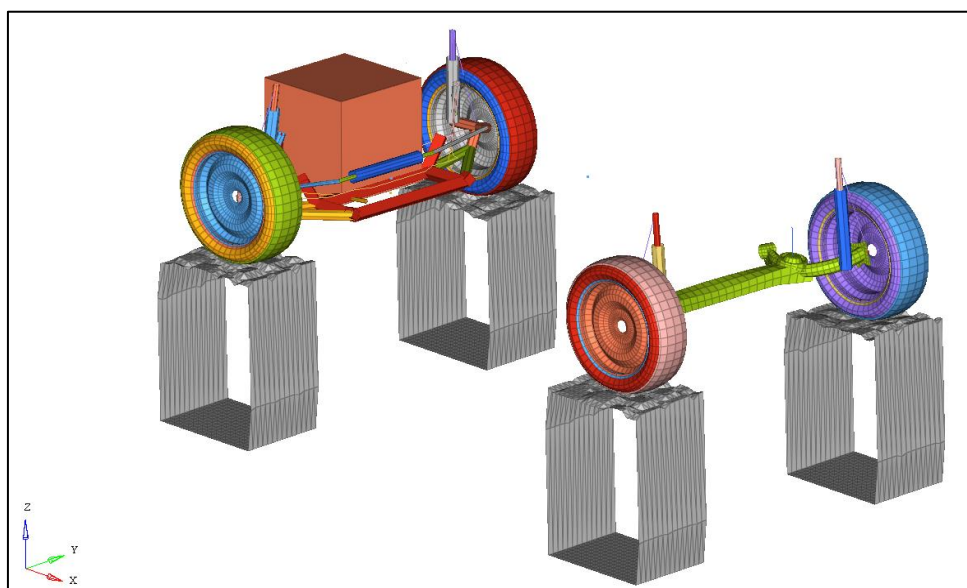


FIGURA 2.15 – Modelo vRLDA utilizando a pista com a mescla da formulação Lagrangeana e Euleriana
 FONTE: Própria do autor

O ganho principal desta formulação, conforme **PULEO** et al. (2011) foi à redução drástica de interações de contato gerenciadas pelo algoritmo do *Abaqus* bem como número de nós e elementos do modelo. Além disso, não foi mais necessário dividir a pista em vários trechos conforme abordagem anterior.

Cabe ressaltar que além do *Pave Belga*, as pistas *Procaccini*, *Onda Breve*, *Traversine* e *PotHole*, as quais compõem o bloco de durabilidade adotado pela FCA, foram aplicadas ao método vRLDA para predição de cargas, utilizando a abordagem anteriormente descrita.

2.4 Acúmulo de danos e contagem de ciclos

2.4.1 Mecanismo do dano à fadiga

Segundo **LEE** et al. (2005), fadiga é um processo de dano localizado em um componente produzido por uma carga cíclica. É o resultado do processo cumulativo que consiste basicamente na iniciação da trinca, propagação e finalmente a fratura do componente. Um dado componente sujeito a um carregamento cíclico pode sofrer deformações plásticas localizadas em regiões de altas tensões. Essa deformação plástica induz a danos permanentes no componente resultando em uma trinca. À medida que o componente é submetido a um número crescente de ciclos de carga, o comprimento da trinca, chamado de dano, aumenta. Após certo número de ciclos, a trinca fará com que o componente falhe (separação do componente).

Geralmente, observou-se que o processo de fadiga envolve as seguintes etapas na seguinte sequência: nucleação da trinca, crescimento curto da trinca, crescimento longo da trinca e finalmente fratura final. Trincas começam em planos de cisalhamento localizados em ou perto de altas concentrações de tensão, como, inclusões, porosidade ou descontinuidades. O plano de cisalhamento localizado geralmente ocorre na superfície ou dentro dos limites de grão. A fase de nucleação da trinca é o primeiro passo no processo de fadiga. Uma vez que a nucleação ocorre e a carga cíclica persiste, há a propagação da trinca ao longo do plano de máxima tensão de cisalhamento e através do limite de grão. A figura 2.16, ilustra o desenvolvimento gráfico do processo de dano por fadiga, **LEE** et al. (2005).

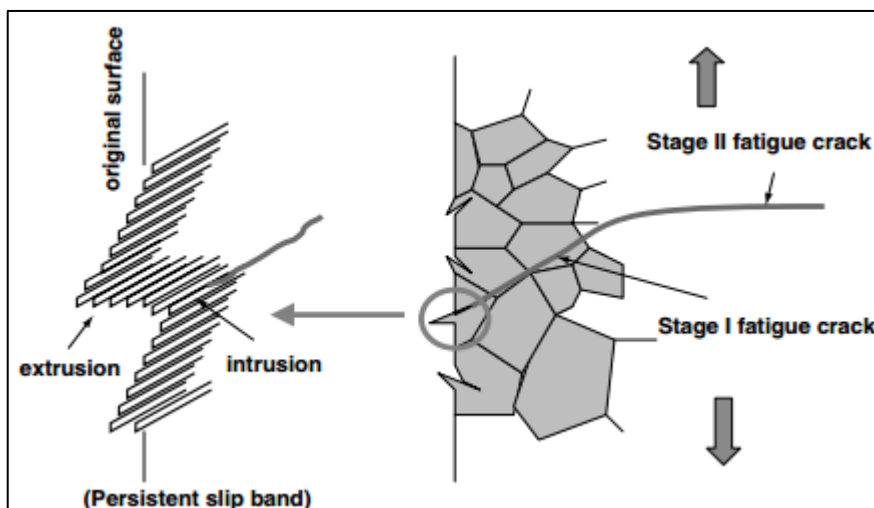


FIGURA 2.16 – Mecanismo de dano por fadiga.
 FONTE: Lee et al. (2005)

O lado esquerdo da figura 2.16 representa o detalhe da nucleação da trinca. Ocorre na região de concentração de tensões e esforços sollicitantes de cisalhamento constante. O próximo passo no processo de fadiga é o estágio de crescimento de trinca. Esta etapa é dividida entre o crescimento da trinca no estágio I e no estágio II. No estágio I, a nucleação e propagação inicial curta, são da ordem de tamanho de grão da microestrutura do material e ocorrem no plano máximo de tensão cisalhante local. Já no estágio II, o crescimento da trinca é normal ao plano de tensão de tração principal e na direção da tensão cisalhante máxima, e a propagação da trinca ocorre de forma relativamente rápida em relação ao estágio II. Normalmente, o período de início da trinca é responsável pela maior parte da vida a fadiga de um componente feito de aço, particularmente no regime de fadiga de ciclo alto (aproximadamente > 10.000 ciclos). No regime de fadiga de baixo ciclo (aproximadamente < 10.000 ciclos), a maior parte da vida de fadiga é gasta na propagação de trinca.

2.4.2 Teoria linear de acúmulo de danos

Componentes e sistemas submetidos a carregamentos cíclicos estão sujeitos, conseqüentemente, a várias amplitudes de tensão alternada e diferentes valores de tensão média, isso significa que essas amplitudes assumem um comportamento aleatório no tempo, **SANTOS** (1999). Portanto, para estimar a vida nessas condições, devem ser aplicadas teorias de acúmulo de danos por fadiga. Estas, segundo **FATEMI** (1998),

podem ser agrupadas em várias categorias, dentre elas teorias lineares de acúmulo de danos e teorias não lineares de acúmulo de danos.

Segundo **LEE** et al. (2005), o dano à fadiga pode ser definido pelo acúmulo do comprimento da trinca em direção a um comprimento máximo aceitável da trinca. Em outras palavras, se uma amostra lisa com um comprimento de trinca de af , é submetida à carga cíclica em que a trinca final tenha comprimento de a . O dano D , para uma determinada tensão S_1 , é a relação de a para af .

$$D = \frac{a}{af} \quad (2.6)$$

Ainda segundo **LEE** et al. (2005), considerando uma sequência de aplicação de cargas cíclicas, uma de alta amplitude n_1 e as remanescentes até a falha de baixa amplitude n_{2f} conforme mostra a figura 2.17. As chamadas curvas S-N, fadiga controlada por tensão, são utilizadas para obter as vidas à fadiga em número de ciclos N_{1f} e N_{2f} para cada amplitude de carregamento, conforme ilustra a figura 2.17:

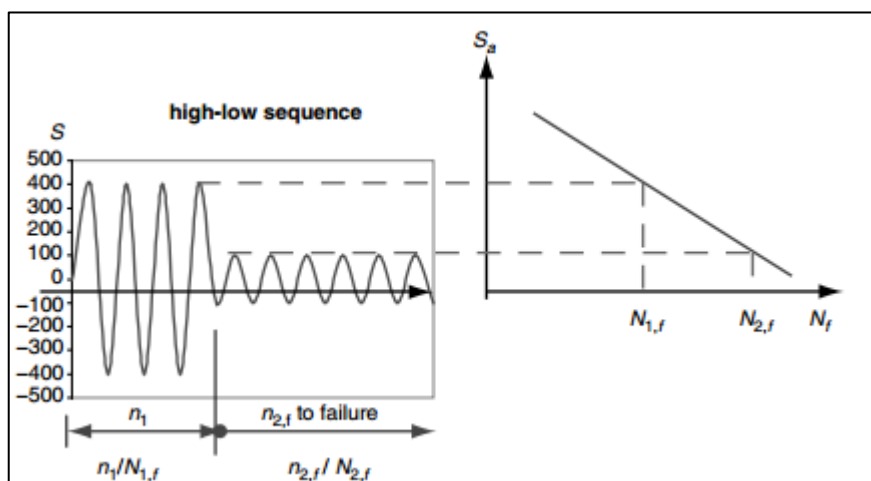


FIGURA 2.17 – Sequência de carregamentos e curva S-N de fadiga para predição de vida.
FONTE: Lee et al. (2005)

A teoria linear de acúmulo de danos foi proposta por Palmgren em 1924 para aplicações na indústria de rolamentos, mas foi desenvolvida por Miner em 1945, que em seus trabalhos conseguiu resultados significativos relativos às predições de fadiga de componentes de aeronaves quando comparados a resultados experimentais. Desta forma

a teoria linear de acúmulo de danos é comumente referenciada como regra de Miner, **LEE** et al. (2005).

Da curva S-N, proposta primeiramente por August Wöhler em 1842, por definição, um dado componente operando a uma dada tensão alternada S_1 terá por consequência um dano completo ou virá a falhar em N_1 ciclos. Se o componente trabalhar com uma amplitude de tensão S_1 , porém por um número de ciclos n_1 menor que N_1 , o componente sofrerá somente uma parcela de dano D_1 . Desta forma, submetido amplitudes variáveis, um componente terá vários níveis de tensões atuantes, resultando em uma fração de dano D_i para cada diferente nível de tensão S_i , **SANTOS** (1999). Logo a definição da regra de Miner mostra que a falha ocorrerá de o dano total acumulado for, conforme a equação 2.6, unitário ou maior que 1:

$$D_1 + D_2 + D_3 + \dots + D_{i-1} + D_i \geq 1 \quad (2.7)$$

Sendo que o dano pode ser expresso, segundo equação 2.7:

$$D_i = \frac{n_i}{N_{i,f}} \quad (2.8)$$

Onde n_i é o número de ciclos correspondente a uma tensão S_i da curva S-N em que o componente é submetido, e $N_{i,f}$ é o número total de ciclos para a mesma tensão S_i .

A principal limitação da regra de Miner é a não observância da ordem dos níveis de carregamentos aplicados. **LEE** et al. (2005) em seu trabalho observa que há grande influência no dano quanto a ordem de aplicação dos carregamentos, já que em altas amplitudes de tensão a nucleação das trincas se inicia em poucos ciclos, e em baixas amplitudes, quase toda a vida a fadiga é gasta para a nucleação. Diversos resultados experimentais, tais como os resultados de **PHILIPS** (1999) e **LAUE** et al. (2005), demonstraram que a falha final do componente submetido a teste, pode ocorrer para valores de dano, calculados com base na regra de Miner, inferiores à unidade, caso a sequência do carregamento seja no sentido das amplitudes de cargas mais altas para as amplitudes mais baixas, ou para valores de dano superiores à unidade, caso a sequência do carregamento aplicado seja no sentido das menores amplitudes para as maiores. Outros trabalhos que evidenciam limitações da teoria de acúmulo de danos linear são os

de **WIRSHING** et al. (1995) e **LEE** et al. (1999) que mostram que há grande variação na média dos valores de dano.

Outras teorias, não lineares, de acúmulo de danos foram desenvolvidas com o intuito de tentar melhorar as limitações da teoria linear de acúmulo de danos. Destacam-se de Marco-Starkey a qual se baseia em diferentes curvas de danos para cada nível de tensão, teoria de Henry que propõe uma mudança da curva S-N devido ao acúmulo de danos. Há também a regra de dano linear duplo de Manson e Halford, que, segundo **LEE** et al. (2005), é recomendada para projetos de engenharia para durabilidade.

2.4.3 Contagem de Ciclos

Componentes mecânicos em serviço, durante sua vida, estão sujeitos a cargas e conseqüentemente tensões cíclicas. A amplitude destas cargas ou tensões pode ser constante ou variável com o tempo. Quando são constantes, o cálculo das amplitudes é de maneira geral simples, e conseqüentemente o cálculo do dano. Porém se amplitude da força ou mesmo da tensão atuante é variável com o tempo, como por exemplo, o sinal de força no centro da roda de um veículo transitando em um pavimento acidentado figura 2.18, há a necessidade de métodos específicos para a contagem dos ciclos, **LEE** et al. (2005).

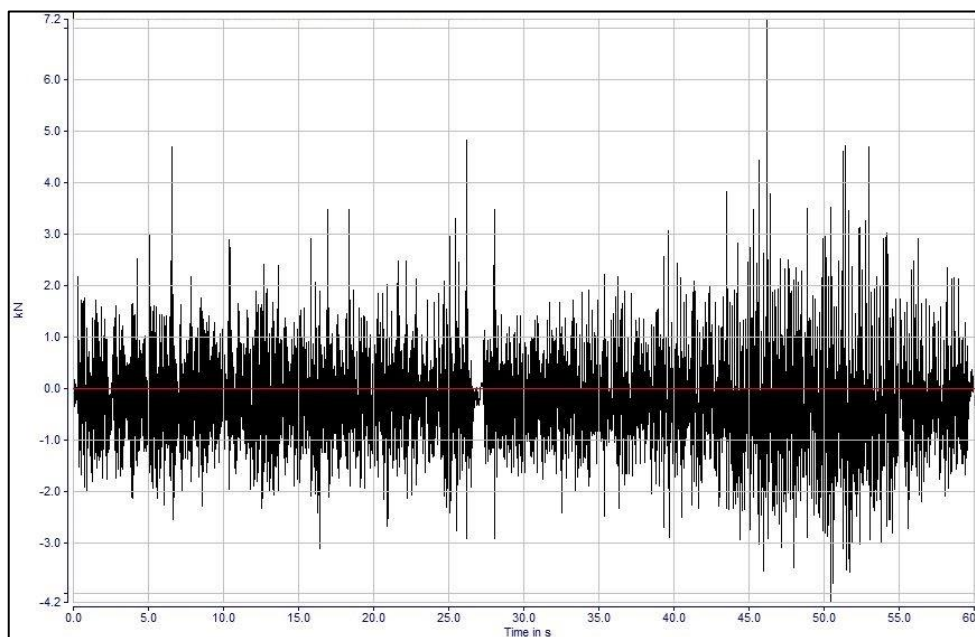


FIGURA 2.18 – Exemplo de um sinal (*Pave Belga*) aleatório proveniente de passagem de pista.
FONTE: Própria do autor

A contagem de ciclos pode ser extraída de uma história temporal, e pode ser feito com o parâmetro de interesse como força, torque, tensão, deslocamento, aceleração dentre outros. No presente trabalho, o foco das contagens de ciclo será em históricos temporais de força para se atingir o objetivo proposto no trabalho.

2.4.3.1 Contagem de ciclos por Level Crossing

Neste método, as magnitudes das cargas provindas da história temporal são divididas em vários níveis. Basicamente, uma contagem de uma amplitude de carregamento é considerada quando uma parte da história temporal de carregamento ascendente cruza com a amplitude da carga de referência ou quando uma parte da história temporal descendente cruza com a magnitude de carga de referência. A carga de referência pode ser determinada pela média do sinal de história temporal ou pela contagem de todos os níveis de carregamentos, conforme ilustra a figura 2.19 a seguir:

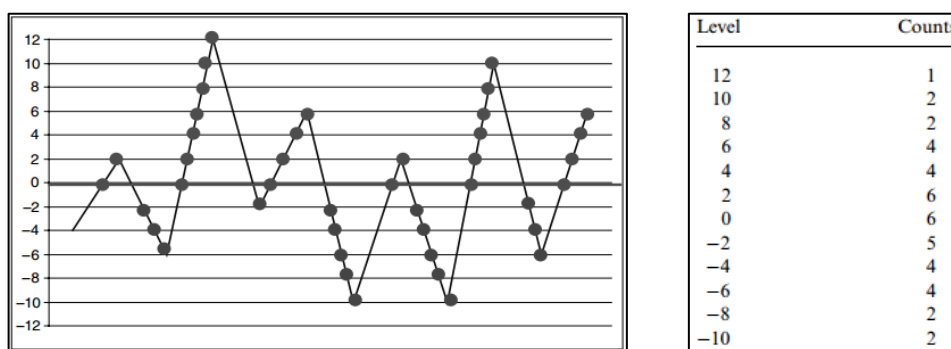


FIGURA 2.19 – Exemplo de uma contagem de ciclos por *Level Crossing* todos os níveis.
FONTE: Lee et al. (2005)

2.4.3.2 Contagem de ciclos por Rainflow

Na contagem de ciclos por *rainflow*, conforme ANTHES (1997) há um método específico modificado em relação ao *rainflow* original que consideram o efeito da ordem de aplicação dos carregamentos, que conforme já mencionado no presente trabalho, tem influência considerável na durabilidade. Neste método do *rainflow* modificado, cada meio ciclo ascendente é contado como um evento de dano. Quando esse meio ciclo não fecha um loop de histerese, é então considerado como um loop

virtual de histerese, o qual será complementado ou eventualmente fechado posteriormente. Porém, conforme COLLINS (1993), mesmo o *rainflow* original não considerando a sequência de carregamentos, é um método robusto, pois apresenta bons resultados.

Conforme descrito por SANTOS (1999) em seu trabalho e baseado em COLLINS (1993), a contagem dos ciclos pelo *rainflow* obedece a “queda de chuvas” sucessivas, dentro dos picos e vales máximos e mínimos respectivamente. A seguir, uma breve descrição de um exemplo de contagem *rainflow*, conforme retirado de SANTOS (1999):

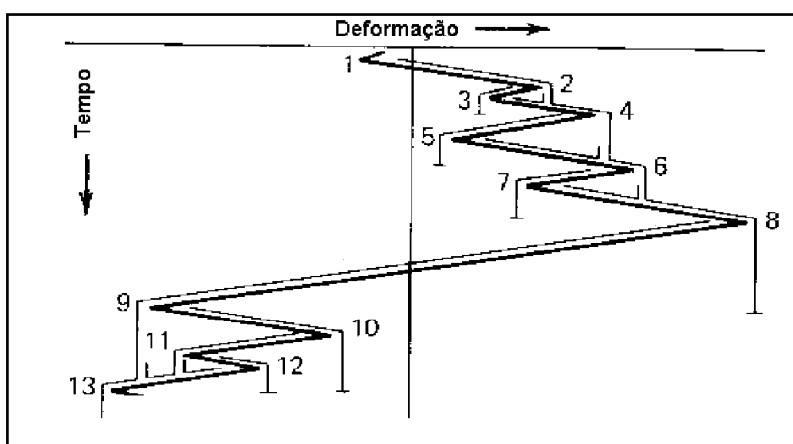


FIGURA 2.20 – Exemplo de uma contagem de ciclos por *rainflow*.
 FONTE: Santos (1999)

Seguindo a figura 2.20, têm-se as seguintes regras para contagem por *rainflow*:

- O fluxo começa no vale 1 e termina no vale 9. Isso, porque o vale 9 é maior, ou seja, mais negativo que o 1. Além disso, um meio ciclo é contado entre o vale 1 e o pico 8. Essa sequência é devido ao fato que ao fluxo da “queda de chuva” é permitido o escoamento de uma inclinação para outra até que se inicie um vale oposto mais negativo.
- O fluxo começa no pico 2 e termina no pico 4 oposto, e um meio ciclo deve ser contado entre o pico 2 e vale 3. De forma semelhante, se o fluxo se inicia em um pico, ele deverá ser finalizado no pico oposto de maior magnitude do que o inicial.
- O “fluxo da chuva” deve ser finalizado se ele encontrar o fluxo vindo de uma inclinação acima, como mostra a figura 2.19, o fluxo começa em 3 e termina abaixo do pico 2.

- Quando o procedimento descrito acima finalizar, devem ser combinados os eventos para formação dos ciclos.

2.5 Ensaios de durabilidade físicos em campo e em banco de testes

Esta seção visa apresentar as provas de durabilidade físicas realizadas atualmente pela FCA, para avaliação tanto de carroceria quanto de componentes de chassi.

2.5.1 *Latam Durability Schedule - LDS*

Conforme já mencionado na introdução, o LDS é o esquema de provas, realizado em vias públicas, utilizado pela FCA polo América do sul, mais especificamente no Brasil, para avaliação e validação de durabilidade com foco nos sistemas e componentes da carroceria.

O LDS foi criado a partir da necessidade de uma forma de avaliação de durabilidade dos projetos de veículos feitos no Brasil, visto que o envio dos carros protótipos para os campos de prova dos polos EMEA ou NAFTA tem custos financeiros e logísticos muito altos (Quando o envio acontece, os carros são enviados por via marítima geralmente para Balocco na Itália).

O LDS é baseado no histórico de registros de dados de garantia de concessionárias e reclamações de clientes. A partir destes dados, foram propostos os tipos de estrada, locais, quilometragens totais, dentre outros parâmetros. Vale ressaltar que o LDS é somente executado no Brasil por consequência do fato da FCA LATAM não possuir um campo de provas próprio neste polo.

2.5.1.1 Definição e execução do teste LDS

Conforme o documento apostila ***DURABILITY LATAM LATERAL LOADS STRATEGY GLOBAL DURY MTG OCT 24 16*** (2016), o método a seguir para realização do LDS visa induzir um dano acumulado acelerado para avaliação estrutural de durabilidade dos projetos que represente a utilização do veículo por 95% dos consumidores durante 10 anos. Após a realização do percurso apresentado a seguir, são

feitas verificações em partes críticas da carroceria, como regiões de componentes que possuem concentradores de tensões, como soldas e extremidades:

- 40% em estrada de asfalto;
- 40% em calçamento de pedra, conforme exemplo da figura 2.21 (a);
- 20% em estrada de terra, conforme exemplo da figura 2.21 (b).



FIGURA 2.21 – Tipos de pavimentos utilizados no LDS - (a) Calçamento de pedra; (b) Percurso de terra.

FONTE: (a): Própria do autor; (b): Própria do autor.

Em relação ao peso do veículo, 50% do LDS são realizados considerando carga máxima permitida do veículo e 50% do trajeto, o mais leve possível, ou seja, somente o motorista e o peso adicional dos equipamentos. Para os 50% em plena carga, geralmente, ao peso do veículo mais instrumentação e motorista, são adicionados sacos de areia de 5 kg, 10 kg, 20 kg, conforme exemplo da figura 2.22 abaixo, de forma a complementar o peso faltante para a plena carga.



FIGURA 2.22 – Pesos adicionais para a realização do LDS a plena carga.
FONTE: Própria do autor

Para tentar minimizar a desvantagem da falta de repetitividade entre os testes, inerentes a utilização de vias públicas, foram definidos locais próximos às instalações da FCA planta Betim onde o LDS é sempre executado. O percurso de calçamento é comumente chamado de Tropical, e é feito no bairro Tropical em Contagem. O percurso de estrada de terra é chamado de Igaratinga, feito no município de Igaratinga, e o trecho de asfalto são feitos nas rodovias que circundam a planta da FCA Betim. A velocidade de execução do teste é de 60 km/h a 70 km/h para Tropical e Igaratinga, já para as vias de asfalto, a velocidade é a máxima permitida pela via ou pelo tráfego.

Segundo norma **FCA LP.7T015** (2017), antes dos testes, o protótipo passa por algumas preparações, que são:

- Checagem funcional do veículo, que constitui o armazenamento dos números de lote de cada peça do protótipo;
- Medição de peso por eixo e altura de solo;
- Medição do elastocinematismo das suspensões;
- Identificação das rigidezes de buchas de suspensão e outras partes do veículo;
- Identificação das rigidezes das molas e amortecedores;
- Teste da instrumentação necessária do veículo para o LDS.

Ainda segundo essa norma, a instrumentação necessária para o LDS é um conjunto de instrumentos, instalados no veículo, como mostra os exemplos da figura 2.23 (a), (b), (c), (d), os quais são os mais comuns: transdutores de força nos centro das rodas, acelerômetros, transdutores lineares e angulares de curso, *strain gages*, sistema de telemetria, plataforma inercial, equipamento para registro de velocidade, rotações do motor, distância percorrida, ângulo de volante dentre outras informações. Todo esse equipamento fornecerá histórias temporais de vários canais de medição, como forças no centro das rodas, acelerações no topo dos amortecedores, deslocamento das rodas, velocidade do veículo dentre outros.



FIGURA 2.23 – Carro protótipo instrumentado para o LDS conforme norma FCA LP.7T0 15. (a) – Veículo pronto para o teste; (b) detalhe da roda dinamométrica para a medição de cargas no centro roda; (c) Instrumentação no interior do veículo; (d) exemplo de um acelerômetro colado no trilho do banco.

FONTE: Própria do autor

2.5.2 Provas a banco para durabilidade chassi

A FCA adota duas normas que visam testar estruturalmente os componentes separadamente pertencentes ao chassi do veículo em bancadas de testes. Nesses bancos, as suspensões isoladas ou mesmo componentes isolados são submetidos a diversas condições de deslocamentos e cargas e posteriormente são avaliados a integridade estrutural das peças conforme objetivos específicos. Estas normas são basicamente divididas em: as que regem as provas a banco quanto à utilização extrema e as de fadiga dos componentes.

De acordo com a norma **7-F5210** (2017), as provas de utilização extrema visam verificar a integridade estrutural dos componentes das suspensões submetidos a casos de utilização extremos, como impactos da suspensão em guias de calçadas dentre outros. Essas provas são feitas aplicando-se deslocamentos no centro roda, no ponto extremo inferior e superior da roda, nas três direções do veículo conforme figura 2.24 e monitorando a carga de reação proveniente.

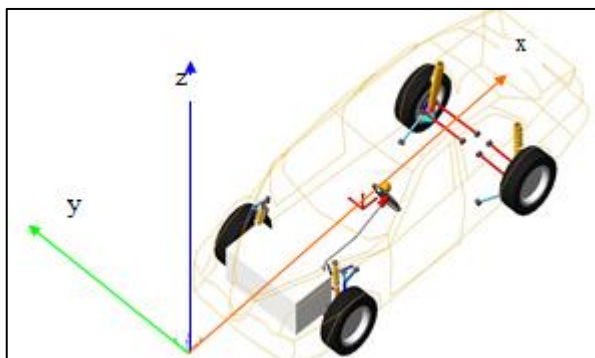


FIGURA 2.24 - As três direções do veículo consideradas para as provas a banco.
 FONTE: Própria do autor

Ainda de acordo com a norma **7-F5210** (2017) e **7-F1510** (2017), estas provas também são chamadas de *cedimentos*, são cinco e descritos a seguir de acordo com a figura 2.24:

- *Cedimento* Vertical borda inferior da roda, direção z no sentido positivo;
- *Cedimento* Longitudinal borda inferior da roda, direção x no sentido positivo;
- *Cedimento* Longitudinal borda inferior da roda, direção x no sentido negativo;
- *Cedimento* Lateral borda inferior da roda direção y no sentido positivo;
- *Cedimento* Lateral borda superior da roda direção y sentido positivo.

Os *cedimentos* são basicamente deslocamentos chamados de extremos, executados por meio de atuadores hidráulicos, nos pontos descritos acima. Durante o teste, é monitorada a carga de reação do atuador e confeccionada uma curva característica do teste resultante, similar a curvas de ensaios de tração de corpos de provas, conforme exemplo da figura 2.25 abaixo:

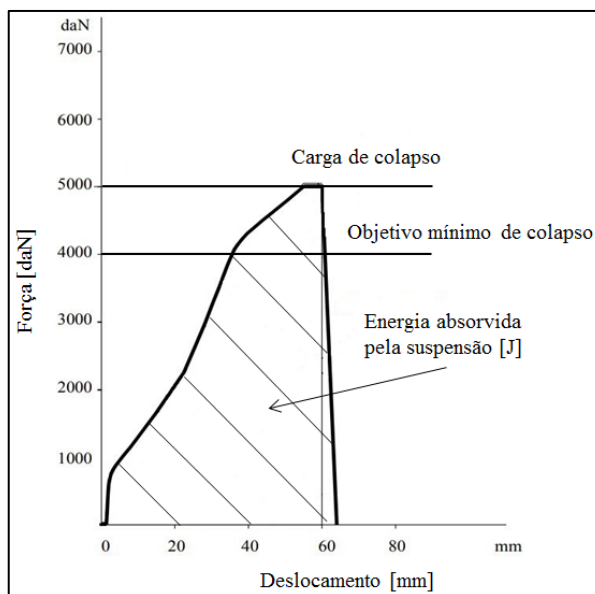


FIGURA 2.25 – Exemplo de uma curva de força x carga de reação.
 FONTE: Própria do autor

O objetivo das provas de *cedimento*, em todos os casos, é alcançar um valor de carga de reação na qual abaixo dela não se pode observar ruptura de qualquer componente da suspensão. Essa carga de reação objetivo é calculada levando em consideração o peso sobre o eixo do veículo, dependendo da suspensão testada, acrescido de coeficientes de segurança. Estes coeficientes de segurança são baseados em dados empíricos provenientes do histórico de vários anos e vários projetos. Por exemplo, como mostra à figura 2.25, a suspensão testada atingiu um valor de carga de colapso acima do objetivo, desta forma, é considerada aprovada.

Já para as provas de durabilidade, de acordo com as normas **FCA 7-F5240** (2004) e **7-N4130** (2004), os testes executados visam avaliar os componentes quanto à vida a fadiga. Atuadores hidráulicos são posicionados devidamente e aplicam cargas pulsantes nas suspensões com o objetivo de causar um dano acelerado nos componentes que represente a vida útil do veículo. Os testes são feitos, assim como os *cedimentos*, em suspensões montadas isoladamente. Cabe aqui ressaltar que os componentes pertencentes ao chassi, diferentemente da carroceria, são dimensionados e testados prevendo vida infinita. De maneira similar aos testes de *cedimento*, os testes de fadiga consideram as três direções do veículo, conforme figura 2.24.

Os testes de Fadiga a Banco existentes são:

- Fadiga vertical: Para a fadiga vertical, conforme a norma FCA **7-F5240** (2004), os atuadores são instalados nos pontos correspondentes ao centro das rodas do mesmo eixo, e aplica simultaneamente em ambas uma carga pulsante simétrica F_z mín a F_z máx na direção z conforme figura 2.24. Os valores das cargas mínimas e máximas visam representar o caso de manobras de fechamento total da suspensão na totalidade de acordo com o possível. O esquema da figura 2.26 a seguir, ilustra a prova.

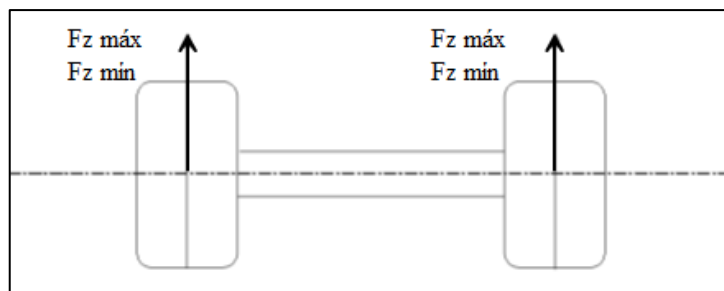


FIGURA 2.26 – Esquema prova de fadiga vertical – Vista frontal da suspensão.
FONTE: Própria do autor

- Fadiga lateral: A fadiga lateral é feita, ainda conforme norma FCA **7-F5240** (2004), visando avaliar a durabilidade da suspensão do veículo sujeita a uma manobra de curva, ou seja, simultaneamente há uma carga lateral e vertical aplicadas ao ponto correspondente à extremidade da roda. As cargas são aplicadas em ciclos correspondendo a lado direito F_{yz} máx e lado esquerdo F_{yz} mín e logo após, lado direito F_{yz} mín e lado esquerdo F_{yz} máx, conforme esquema da figura 2.27 a seguir. O ângulo a considerado no plano yz tem como intuito de representar a força resultante da manobra de curva no plano yz, enquanto a carga P corresponde ao peso do eixo.

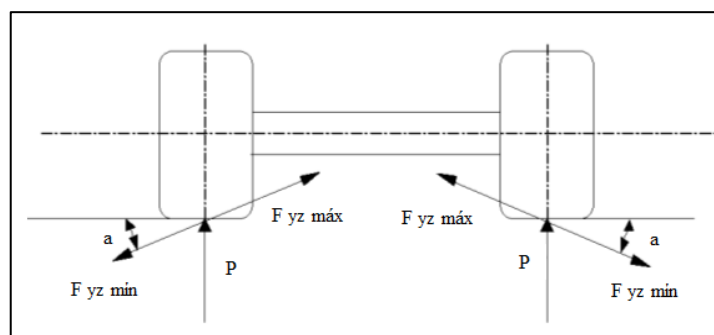


FIGURA 2.27 – Esquema prova de fadiga lateral – Vista frontal da suspensão.
FONTE: Própria do autor

- Fadiga longitudinal: De acordo com a norma FCA 7-N4130 (2004), tem como objetivo avaliar à fadiga os componentes da suspensão dianteira sujeitos à carregamentos longitudinais considerando a figura 2.24, na direção x do veículo. Ressalta-se que este esquema é válido para suspensões traseiras somente se esta for responsável pela tração do veículo. Os valores das forças são baseados nas manobras de aceleração e frenagem do veículo. O esquema da prova é ilustrado na figura 2.28 a seguir:

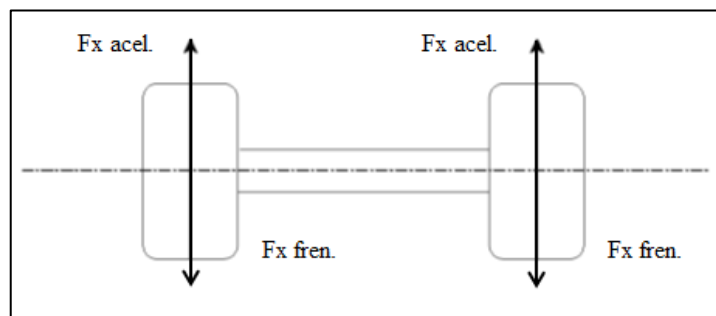


FIGURA 2.28 – Esquema prova de fadiga longitudinal – Vista Superior da suspensão.
FONTE: Própria do autor

As provas de fadiga a banco mencionadas são repetidas seis vezes e tem como objetivo um número específico de ciclos mínimo para que se atinja o fator de confiabilidade de 90%, conforme a distribuição de *Weibull*, conforme LEE et al. (2005). Antes deste objetivo mínimo de ciclos, não são permitidos trincas ou qualquer tipo de falha no componente. A verificação da suspensão é feita a cada 10000 ciclos do ensaio.

3. METODOLOGIA

3.1 Cálculo do dano acumulado baseado em dados reduzidos pelo Tecware

O processamento e redução dos dados provenientes dos sinais do LDS, provas a banco e passagem de pistas dos modelos vRLDA, foram feitos através do software processador de sinais *Tecware (Falancs)*. A seguir serão apresentados os métodos de redução dos sinais e sequência de cálculos a serem executados no software, baseados nas teorias já mencionadas, as quais resultam no dano final acumulado referente a cada teste.

Conforme *FALANCS THEORY MANUAL* (2012), uma série temporal completa ou um histórico de tempo, tal como obtido por um veículo de teste em uma pista de teste, contém muito mais informações necessárias para cálculos de fadiga independentes da taxa em que os dados foram obtidos. Para cálculos e armazenamento eficientes de dados relevantes, é útil simplificar as séries temporais de dados para um formato mais compacto. Formalmente, as séries temporais são funções, conforme equação 3.1:

$$f: [T1, T2] \rightarrow L \quad (3.1)$$

Onde $[T1, T2]$ é o intervalo de tempo de alguma medição e L é o espaço de valores possíveis desta medida, como forças, tensões, etc. Normalmente, têm-se medições em momentos discretos, ou seja, a função f é representada por uma série de valores em instantes de tempos, conforme equação 3.2 e 3.3:

$$t_i = T1 + i\Delta t \quad (3.2)$$

e:

$$\Delta t = \frac{T2 - T1}{N} \quad (3.3)$$

Com $i = 1, \dots, N$ e o N o tempo total do sinal. O método de redução, ou simplificação de dados (contagem de ciclos) transforma os sinais brutos coletados nos experimentos em um conjunto de dados reduzidos, conforme ilustra a figura 3.1 a seguir:

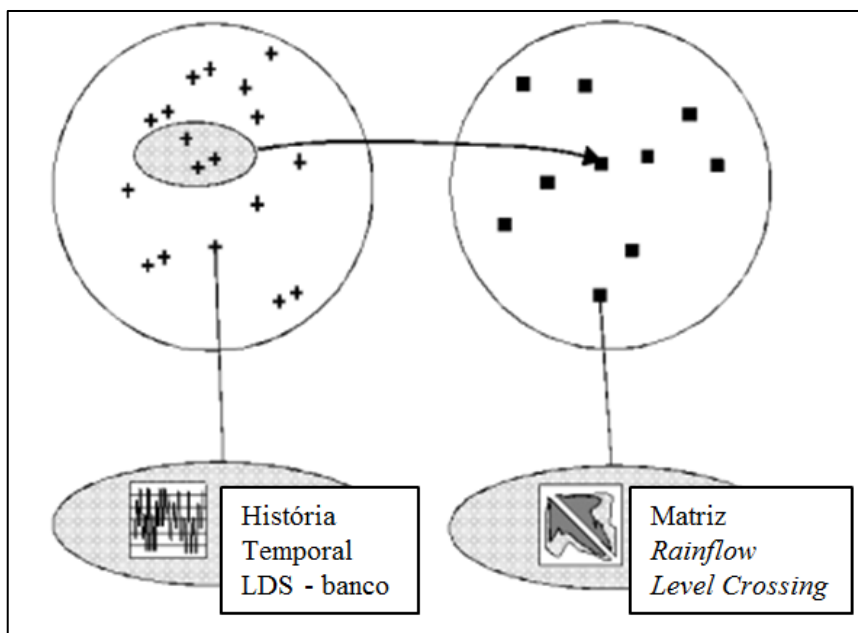


FIGURA 3.1: Processo de simplificação dos sinais pelo Tecware.
 FONTE: Adaptado de *Falancs Theory Manual* (2012).

Tal processo de simplificação, ou redução, é feito de forma a não perder a representatividade das medições do sinal, ou seja, em uma matriz *rainflow* resultante da história temporal, o dano total acumulado deve ser equivalente ao dano do sinal sem simplificações.

Ainda conforme *FALANCS THEORY MANUAL* (2012) há relações entre os métodos de contagem de ciclos, ou seja, um método pode ser derivado para outro sem que haja necessidade de utilizar a história temporal novamente. Isso significa que, através da matriz *rainflow* calculada, tem-se a opção de derivar e visualizar os resultados como *Level Crossing*, *Range Pair* ou outros métodos de contagem de ciclos.

Feitas as matrizes *rainflow* de cada sinal de cada canal de interesse, o cálculo do dano acumulado é feito pelo Tecware através da regra de Miner, utilizando a curva de fadiga S-N padronizada FCA. Essa curva de fadiga padrão utilizada pela FCA para estimar o dano acumulado, foi feita e ajustada com base em dados de vários anos e vários

projetos. Basicamente, a curva foi confeccionada, pela FCA polos NAFTA e EMEA, a partir da avaliação e dos estados finais de componentes de veículos submetidos aos testes de durabilidade, ou seja, dentro de patamares de carregamentos em que os veículos são submetidos, características das pistas, dados estatísticos, quando e onde falhas (dano unitário) ocorriam, dentre outros parâmetros.

Cabe aqui ressaltar que cada fabricante de veículos tem seus próprios meios e métodos de avaliação de durabilidade, sendo assim um vasto conhecimento e *know-how* empírico.

A curva de fadiga utilizada relaciona a amplitude de força por número de ciclos, e é descrita da seguinte forma e exemplificada na figura 3.2: As tradicionais curvas S-N para ligas ferrosas podem ser compostas por uma série de segmentos de linha reta no diagrama log-log. Em níveis elevados de carga, a falha estática devido à tensão máxima do material (S_{max} – Limite de escoamento) pode ser alcançada e é representada pelo segmento horizontal inicial. No nível de tensão abaixo de S_{max} , a amostra pode durar um número relativamente pequeno de ciclos correspondente a N_0 no diagrama. Em amplitudes de tensão mais baixas, o número de ciclos até a falha é relativamente maior, representado na figura 3.2 por um ou dois segmentos inclinados da curva S-N, definidos pelos pontos S1 - N1 e SE - NE, ou pelas inclinações das linhas e pontos iniciais. O último segmento do diagrama S-N é novamente horizontal e indica que, em qualquer amplitude de tensão no limite de resistência (SE), ou abaixo dele, a vida a fadiga é infinita, *FALANCS THEORY MANUAL* (2012).

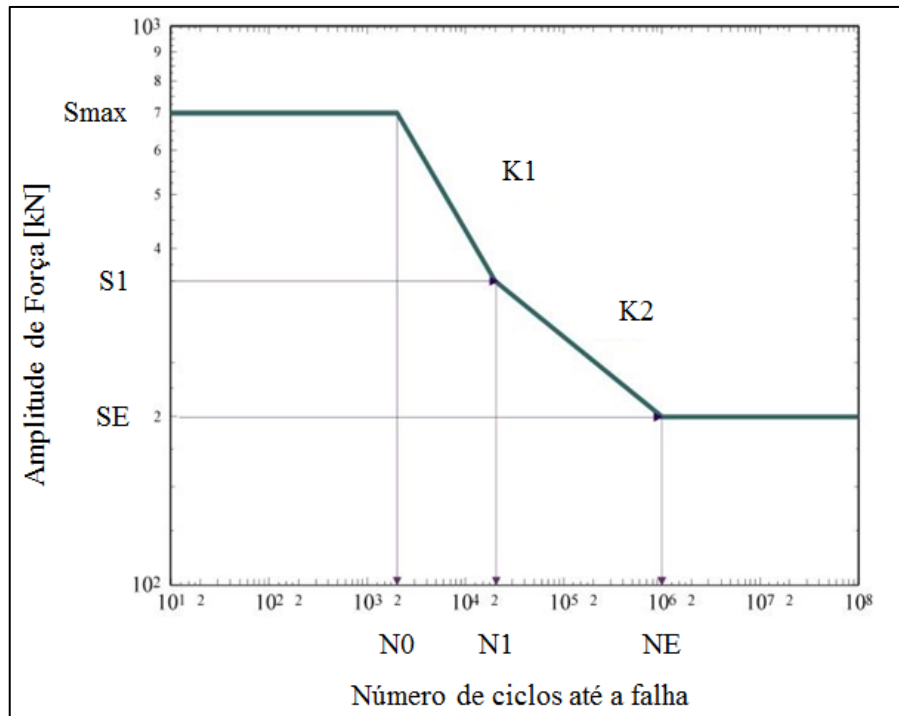


FIGURA 3.2: Representação da curva S-N fadiga padrão.
 FONTE: Adaptado de *Falancs Theory Manual* (2012).

Por questões de confidencialidade de informações, os parâmetros da curva FCA de fadiga padrão não pode ser divulgados no presente trabalho.

Na figura 3.2, NE é o número de ciclos até o limite de resistência a fadiga, SE é a amplitude da carga [kN] correspondente ao limite de resistência, N1 o número de ciclos a um ponto intermediário entre as duas amplitudes, S1 amplitude de força correspondente ao ponto N1, N0 é o número de ciclos correspondente à amplitude máxima de limite de resistência a tração. A partir da representação da curva de fadiga da figura 3.2, o número de ciclos para uma determinada amplitude de força é calculado da seguinte forma:

$$\log N = \begin{cases} 1 & \text{se } S > S_{max} \\ \log N_1 - K_1(\log S - \log S_1) & \text{se } S_1 \leq S \leq S_{max} \\ \log N_E - k_2(\log S - \log S_E) & \text{se } S_E \leq S \leq S_1 \\ \infty & \text{se } S \leq S_E \end{cases} \quad (3.4)$$

Dentro do intervalo de $S_E \leq S < S_{max}$, o número de ciclos também pode ser calculado por:

$$\frac{N}{NE} = \left(\frac{SE}{S}\right)^{k2} \quad (3.5)$$

e:

$$\frac{N}{N1} = \left(\frac{S1}{S}\right)^{k1} \quad (3.6)$$

E conforme já mencionado, o dano correspondente a um evento de carga ($n=1$), é calculado, de acordo com a regra de Miner, pela inversão do valor de N ou elevando-se N ao expoente -1. É válido ressaltar que a inclinação da curva log-log é definida pelo fator k. Este fator, claramente, governa a relação entre a amplitude de carga e número de ciclos até a falha. Dada esta relação log x log e as equações 3.5 e 3.6, uma pequena variação da amplitude da carga pode acarretar em uma alteração bastante considerável no dano resultante. Isso é evidenciado pela tabela 3.1 abaixo:

TABELA 3.1
Fator k versus Amplitude de carga e vida a fadiga

	Fator K=3	Fator K=5	Fator k=7
Amplitude	Vida a fadiga	Vida a fadiga	Vida a fadiga
1.00	1.00	1.00	1.00
1.15	0.66	0.50	0.38
0.87	1.50	2.00	2.65

De acordo com estas relações da tabela 2, para um fator $k=5$ utilizado na curva de fadiga do presente trabalho, por exemplo, com um aumento de 15% da amplitude, a vida a fadiga cai pela metade. Geralmente, como regra, de acordo com **FALANCS THEORY MANUAL** (2012), adota-se para o cálculo de fadiga os seguintes fatores k:

- Fator $k=7$ para alumínio;
- Fator $k=5$ para aço;
- Fator $k=3$ para soldas.

Desta forma, o fluxograma da figura 3.3 abaixo resume o processo de cálculo executado pelo *Tecware*:

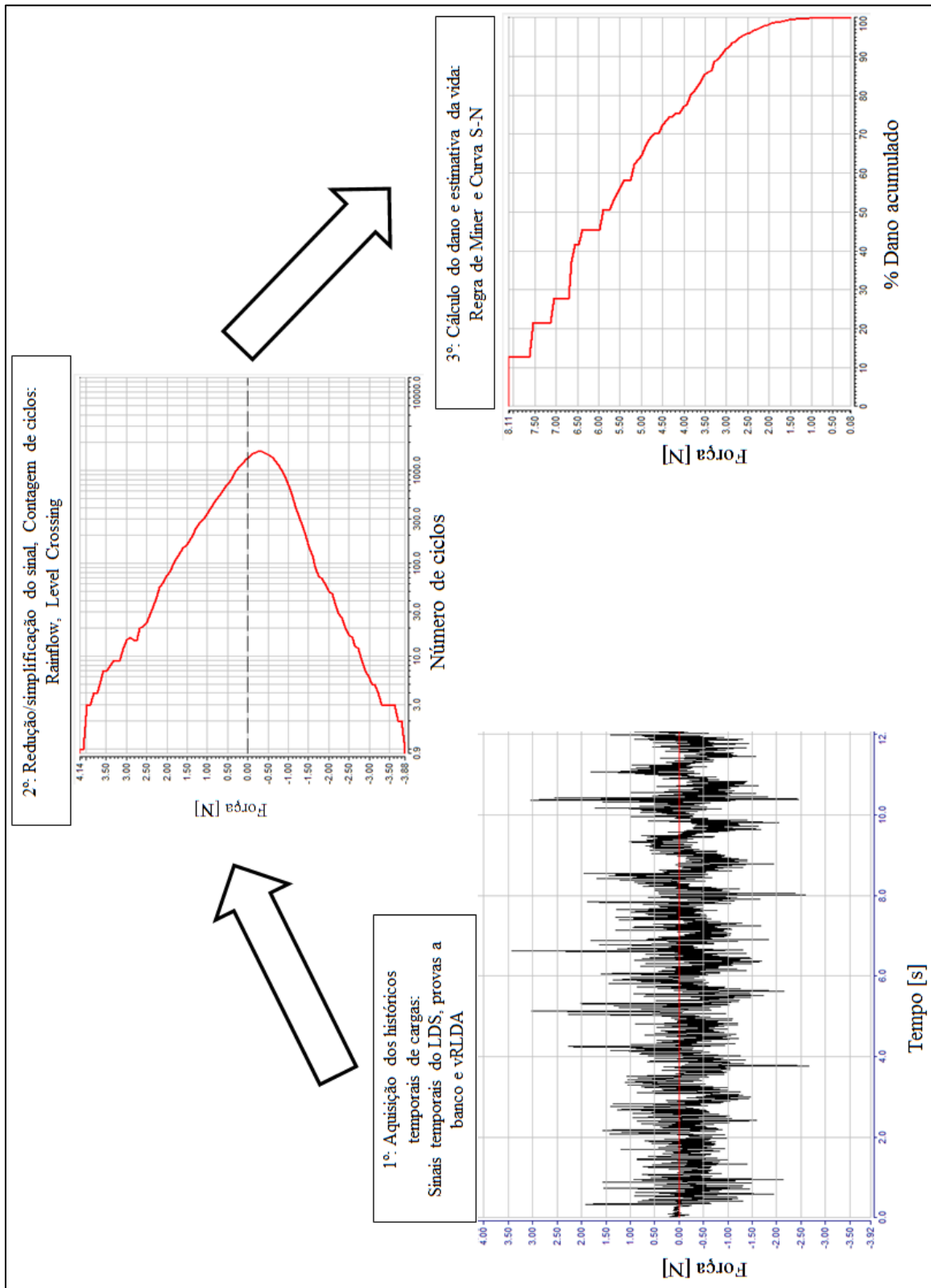


FIGURA 3.3: Fluxograma simplificado do cálculo feito no *Tecware*.

FONTE: Própria do Autor

3.2 Projetos utilizados para validação do percurso virtual proposto

Para a realização do presente trabalho, foram utilizados dados experimentais e virtuais de quatro projetos. Os principais parâmetros destes quatro projetos relevantes à geração de cargas, e construção dos modelos vRLDA, são apresentadas na tabela 3.2:

TABELA 3.2
Parâmetros dos quatro projetos utilizados no presente trabalho

	Peso eixo Dianteiro [kg]	Peso eixo traseiro [kg]	Peso total [kg]	Dimensão Do Pneu	Pressão Pneus [Psi]	Rigidez Suspensão Dianteira* [N/mm]	Rigidez Suspensão Traseira* [N/mm]
Projeto 1 Veículo passeio Hatch pequeno	723.0	733.0	1456.0	175 65 R14	30/30	21.2	18.3
Projeto 2 - Veículo passeio Hatch médio	844.0	778.0	1622.0	205 50 R17	32/32	19.6	18.3
Projeto 3 - Veículo comercial Pick-up	824.0	1195.5	2019.5	205 55 R16	29/29	20.4	31.2
Projeto 4 Veículo passeio Pick-up	1115.0	1821.0	2936.0	225 65 R17	35/45	27.4	35.8

*Valores de rigidez vertical da suspensão no trecho linear do curso da suspensão, ou seja, rigidez da mola e rotacional das buchas de suspensão antes da entrada do batente da suspensão.

Tais dados apresentados correspondem às condições de pesos (veículo + motorista + carga completa + instrumentação) e pneus mais críticas previstas no projeto, ou seja, dentro da gama de versões de cada veículo disponíveis, o dimensionamento e verificação do projeto são feitos nos carros mais pesados e com conjunto roda e pneus maiores, e estes últimos calibrados com a maior pressão possível.

3.3 Sinais LDS

Conforme mencionado previamente na revisão bibliográfica, o percurso da prova LDS é dividido em 40% de asfalto, 40% de calçamento e 20% de estrada de terra. O percurso total é composto por 25.000 km, que busca representar a vida quanto à durabilidade do veículo sobre ótica da carroceria. A principal limitação do LDS é não ser capaz de

representar principalmente os esforços laterais (provenientes de curvas) e os esforços longitudinais (provenientes de acelerações e frenagens no caso da suspensão dianteira) nos componentes dos chassis. As tabelas 3.3, 3.4, 3.5 e 3.6 a seguir mostram a distribuição do circuito da prova de LDS feita para cada um dos projetos:

TABELA 3.3
Distribuição do circuito LDS projeto 1

Projeto 1 – <i>Hatch</i> pequeno		
Pavimento	Local	Extensão percorrida [km]
Terra	Igaratinga	49.28
Calçamento	Tropical	49.04
Asfalto	Betim - Rodovia	51.00

TABELA 3.4
Distribuição do circuito LDS projeto 2

Projeto 2 – <i>Hatch</i> médio		
Pavimento	Local	Extensão percorrida [km]
Terra	Igaratinga	61.4
Calçamento	Tropical	26.34
Asfalto	Betim - Rodovia	46.62

TABELA 3.5
Distribuição do circuito LDS projeto 3

Projeto 3 – Pick-up (comercial)		
Pavimento	Local	Extensão percorrida [km]
Terra	Igaratinga	237.6
Calçamento	Tropical	50.4
Asfalto	Betim - Rodovia	49.7

TABELA 3.6
Distribuição do circuito LDS projeto 4

Projeto 4 – Pick-up (passeio)		
Pavimento	Local	Extensão sinal [km]
Terra	Igaratinga	95.3
Calçamento	Tropical	49.8
Asfalto	Betim - Rodovia	48.0

Todas as aquisições serão feitas, para a composição da prova, no sentido de ida e volta com uma taxa de aquisição de $f = 204.8$ Hz. Cada tipo de pavimento e cada passagem (ida e volta, carregado ou vazio) gera um sinal distinto para o centro roda. No percurso de rodovia, a velocidade de cada prova será realizada conforme o tráfego e velocidade

máxima permitida, ou seja, variou-se de 0 km/h a 110 km/h. Já para os percursos de calçamento e estradas de terra, a velocidade dos percursos, se manterá a 60 km/h. Após o término das medições, os sinais serão devidamente tratados (aplicados filtros passa-baixa 50Hz, remoção de *spikes*) dentre outros procedimentos. Para cada sinal, será aplicado um fator de multiplicação no *Tecware*, para que fosse encontrado o dano acumulado total referente aos 25.000 km (5.000 km Terra, 10.000 km calçamento e 10.000 km Asfalto) sendo que destes, 50% veículo carregado e 50% veículo vazio, objetivo final do LDS, como mostram as tabelas 3.7, 3.8, 3.9, 3.10 a seguir:

TABELA 3.7
Número de repetições de cada sinal para composição do dano total LDS – Projeto 1 – *Hatch* pequeno

	Distância percorrida [km]	Repetições por tipo de pavimento (25000 km)	Número de sinais Carro Carregado Ida/volta	Número de sinais Carro Vazio Ida/volta	50% do percurso LDS Carro Carregado	50% do percurso LDS Carro Vazio	Número de repetições Sinal carro carregado	Número de repetições Sinal carro vazio
Terra	49.28	101.46	2	1	50.73	50.73	25	51
Calçamento	49.03	203.94	3	3	101.97	101.97	34	34
Asfalto	51.00	196.08	3	3	98.04	98.04	33	33

TABELA 3.8
Número de repetições de cada sinal para composição do dano total LDS – Projeto 2 – *Hatch* médio

	Distância percorrida [km]	Repetições por tipo de pavimento (25000 km)	Número de sinais Carro Carregado Ida/volta	Número de sinais Carro Vazio Ida/volta	50% do percurso LDS carro Carregado	50% do percurso LDS carro Vazio	Número de repetições Sinal carro carregado	Número de repetições Sinal carro vazio
Terra	61.40	81.43	2	2	40.72	40.72	20	20
Calçamento	26.34	379.65	3	3	189.83	189.83	63	63
Asfalto	46.62	214.50	2	2	107.25	107.25	54	54

TABELA 3.9

Número de repetições de cada sinal para composição do dano total LDS – Projeto 3 – *Pick-up* (comercial)

	Distância percorrida [km]	Repetições por tipo de pavimento (25000 km)	Número de sinais Carro Carregado Ida/volta	Número de sinais Carro Vazio Ida/volta	50% do LDS Carro Carregado	50% do percurso LDS carro Vazio	Número de repetições Sinal carro carregado	Número de repetições Sinal carro vazio
Terra	237.60	21.04	6	6	10.52	10.52	2	2
Calçamento	50.40	198.41	3	3	99.21	99.21	33	33
Asfalto	49.70	201.21	3	3	100.60	100.60	34	34

TABELA 3.10

Número de repetições de cada sinal para composição do dano total LDS – Projeto 4 – *Pick-up* (passeio)

	Distância percorrida [km]	Repetições por tipo de pavimento (25000 km)	Número de sinais Carro Carregado Ida/volta	Número de sinais Carro Vazio Ida/volta	50% do LDS Carro Carregado	50% do percurso LDS carro Vazio	Número de repetições Sinal carro carregado	Número de repetições Sinal carro vazio
Terra	95.29	52.47	4	4	26.23	26.23	7	7
Calçamento	49.81	200.76	3	3	100.38	100.38	33	33
Asfalto	48.00	208.33	3	3	104.17	104.17	35	35

Após a determinação do número de repetições para cada sinal do LDS conforme tabelas acima, o dano total para cada projeto do LDS foi calculado no *Tecware*. Um fato a ser observado quanto ao LDS, é que por não representar o objetivo de durabilidade longitudinal e lateral dos veículos, o foco do LDS é para cargas verticais. Desta forma, usualmente, apesar de existir o bloco de fadiga a banco vertical, usualmente utilizam-se também para validação experimental vertical de componentes de chassis blocos simplificados dos *time histories* do LDS.

3.4 Provas a banco

As forças para as provas a banco para os componentes de chassis, com exceção da direção vertical, diferem basicamente do LDS por não serem derivadas de sinais aleatórios assim como este último. Conforme já mencionado, para os componentes de chassis, as provas a banco são atualmente utilizadas para avaliação de durabilidade, pois por meio de atuadores, consegue-se submeter às suspensões aos esforços laterais, longitudinais e verticais. Outro critério também já mencionado muito importante é que

para o número de ciclos mínimo, o qual as suspensões são submetidas, não podem ser observadas em hipótese alguma trincas, ou seja, falhas por fadiga.

As forças para os três tipos de provas de fadiga a banco, fadiga vertical, lateral e longitudinal, são calculadas por fórmulas analíticas, dadas as condições estáticas dos pesos máximos sobre os eixos considerados, que visam representar de forma aproximada situações limites em manobras do veículo, descritas a seguir. Novamente, por questões de confidencialidade, as fórmulas de equilíbrio estático do veículo para os cálculos das provas de fadiga a banco não podem ser reproduzidas:

- Fadiga Vertical: A força máxima F_z máx conforme figura 2.26, é equivalente a uma força resultante da aceleração de 3.5g do peso do eixo, enquanto que F_z mín corresponde ao peso máximo permitido no eixo. A carga é aplicada de forma pulsante, F_z mín a F_z máx. O objetivo é que a suspensão atinja 200000 ciclos sem nenhuma falha de acordo com a distribuição de Weibull. Tal objetivo é empírico.

A tabela 3.11 a seguir, mostra os valores das cargas utilizadas para fadiga vertical a banco dos quatro projetos:

TABELA 3.11
Cargas para fadiga vertical

Fadiga Vertical - Forças				
	Eixo Anterior		Eixo Posterior	
	F máx [N]	F mín [N]	F máx [N]	F mín [N]
Projeto 1	3230	11310	3360	11740
Projeto 2	3740	13080	3490	12210
Projeto 3	3610	12620	5400	18880
Projeto 4	4850	16960	8180	28620

- Fadiga Lateral: As forças resultantes F_{yz} máx e F_{yz} mín, conforme figura 2.27, correspondem às forças resultantes da transferência do peso entre o eixo do veículo executando uma manobra de curva considerando uma aceleração lateral de 1.0g e 0.5g respectivamente no veículo. O objetivo desta prova é 150000 ciclos de acordo com a distribuição de Weibull. Tal objetivo é empírico.

A tabela 3.12 a seguir, mostra os valores das cargas utilizadas para fadiga lateral a banco dos quatro projetos:

TABELA 3.12
Cargas para fadiga lateral

Fadiga Lateral - Forças								
	Eixo Anterior				Eixo Posterior			
	Fyz máx [N]	Fyz mín [N]	a [°]	P [N]	Fyz máx [N]	Fyz mín [N]	a [°]	P [N]
Projeto 1	7550	2100	32	3230	7570	1230	30	3360
Projeto 2	8480	2510	31	3740	7570	1360	28	3490
Projeto 3	8930	2200	32	3610	13010	1910	32	5400
Projeto 4	12430	2820	33	4850	20880	2770	33	8180

Nota-se pela tabela acima que as cargas estão decompostas pelo ângulo a . Para o cálculo do dano provocado pelas cargas laterais no presente trabalho, serão consideradas as cargas não decompostas, ou seja, serão desconsiderados os ângulos a , sendo assim, as forças serão puramente nas direções y e z no centro das rodas.

- Fadiga Longitudinal: As forças para os testes de fadiga longitudinal, descrito na figura 2.28, correspondem às manobras de aceleração e frenagem do veículo na condição limite de escorregamento do pneu, ou seja, transferência de peso do veículo em torno do eixo y , considerando figura 2.24. O objetivo final do teste são 120000 ciclos sem observância de nenhuma falha. Tal objetivo é empírico. Vale ressaltar que, de acordo com os tipos de suspensões posteriores dos carros da FCA, esta prova a banco é realizada somente para o eixo dianteiro, onde há a tração do veículo.

A tabela 3.13 a seguir, mostra os valores das cargas utilizadas para fadiga longitudinal a banco dos quatro projetos:

TABELA 3.13
Cargas para fadiga longitudinal

Fadiga Longitudinal - Forças				
	Eixo Anterior		Eixo Posterior	
	Fx acel [N]	Fx fre [N]	Fx acel [N]	Fx fre [N]
Projeto 1	2113	3603	2852	1129
Projeto 2	2512	3774	2964	1498
Projeto 3	2436	4769	4586	1793
Projeto 4	3390	6839	6950	2703

Baseado nos objetivos dos testes de fadiga para os três casos citados acima, é possível calcular o dano acumulado experimental de cada teste no centro roda para cada projeto utilizado no presente trabalho, através da curva de fadiga apresentada anteriormente na seção 3.1. Já com o modelo vRLDA, manobras longitudinais e laterais similares serão executadas e os resultados do dano acumulado no centro roda foram comparados com os danos das provas experimentais, e acrescentado ao percurso virtual final proposto.

Cabe aqui observar que, apesar de ter sido apresentado a prova de fadiga vertical a banco e os seus valores, a fadiga vertical virtual do presente trabalho será elaborada com base nos resultados do LDS, já que na prática cotidiana dos projetos FCA, considera-se a fadiga vertical feita a banco uma situação não representativa do mercado brasileiro. Desta forma, quando se trata de solicitações verticais para chassis, no âmbito experimental, blocos de fadiga são montados a partir de time histories do LDS para aplicação em provas a banco.

3.5 Modelos vRLDA dos quatro projetos

Da mesma forma dos ensaios experimentais, o método para avaliação e principalmente para predição de cargas a cálculo não são unificados. Para fadiga virtual de novos projetos, para carroceria, são utilizados sinais experimentais ajustados conforme alguns coeficientes que levam em conta principalmente o peso e características de forma do carro em desenvolvimento. Para os componentes novos de chassis, as cargas para o

projeto virtual são provenientes dos cálculos analíticos que visam representar as situações conforme já descritas as provas a banco. O grande e principal problema dessas considerações, tanto para análises virtuais de carrocerias quanto para chassis, é que além de não ter uma metodologia única, há um grande número de incertezas e erros que são acumulados durante o processo de ajustes. Principalmente para os componentes de carroceria, que dependem de ajustes em sinais de carros já construídos. Destaca-se também o histórico de problemas, que são encontrados somente nas provas experimentais, que não foram identificados de maneira eficiente nas provas virtuais, devido a considerações de carregamentos insuficientes. Desta forma, a metodologia de geração de cargas vRLDA para durabilidade, foi desenvolvida pelo *CRF*, e o presente trabalho visa aplicá-la a necessidade do mercado brasileiro.

Os modelos dos quatro projetos foram montados e ajustados conforme parâmetros da tabela 1 e características do modelo vRLDA apresentadas na revisão bibliográfica. Apesar de o LDS ser executado com 50% do percurso com o carro vazio (motorista + instrumentação) e 50% do carro com a máxima capacidade de carga, os modelos vRLDA foram feitos somente com os pesos correspondentes à máxima capacidade de carga. Isto é uma simplificação que visou à economia de tempo de análises, além dos carros carregados serem mais relevantes para a composição do dano total final, ou seja, o percurso final virtual de fadiga poderá ser ajustado para o dano LDS sem perda de significatividade da amplitude dos eventos. A figura 3.4 ilustra alguns detalhes visuais dos modelos FEM vRLDA montados. Na suspensão dianteira, todos os quatro projetos possuem tipologia *Mc-Pherson*. Já para a suspensão traseira, o projeto 1 e 2 possuem tipologia de eixo de torção, o projeto 3 possui eixo rígido com mola balestra e o projeto 4 *Multi-link*.

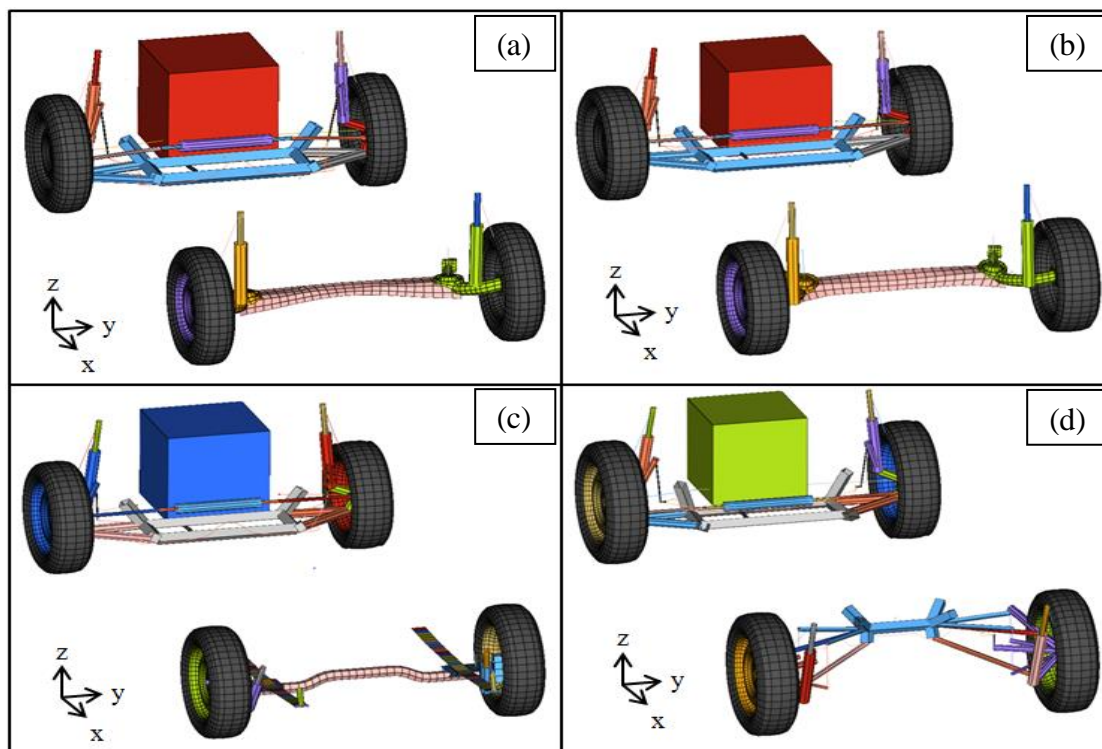


FIGURA 3.4 – Modelos vRLDA (a) – projeto 1 – Suspensões: *Mc-Pherson* e Eixo de Torção; (b) Projeto 2 – Suspensões: *Mc-Pherson* e Eixo de torção; (c) Projeto 3 – Suspensões: *Mc-Pherson* e Eixo Rígido com mola balestra; (d) Projeto 4 – Suspensões: *Mc-Pherson* e *Multilink*.
 FONTE: Própria do autor.

Visando representar à severidade dos obstáculos quanto a impactos no pneu, presentes nos percursos LDS, que geram grandes cargas principalmente verticais e longitudinais, serão escolhidas e executadas, através do algoritmo explícito do software *Abaqus*, passagens nas pistas virtuais digitalizadas *Pave Belga* e *PotHole*. Os perfis das pistas virtuais são mostrados nas figuras 3.5, 3.6. Já para a representação das provas a banco, as quais se destacam as provas de fadigas longitudinal e lateral, serão utilizadas manobras estáticas do algoritmo implícito do software *Abaqus*, conforme ilustra a figura 3.7. Manobras de aceleração para cada veículo (máximo atrito do modelo de pneu com o pavimento), frenagem correspondente a uma aceleração da gravidade longitudinal ao veículo de 1.0 g e acelerações laterais na direção y, conforme figura 2.24, positiva e negativa, também de 1.0g, as quais simulam manobras de curvas extremas.



FIGURA 3.5 – Perfil da pista virtual digitalizada *Pave Belga* (calçamento)

FONTE: Própria do autor.

Além do *Pave Belga*, que é um tipo de calçamento feito de pedras, o *PotHole* é um obstáculo que simula a passagem das rodas do veículo em buracos, muito comuns no percurso LDS. No campo de testes de *Balocco* da Itália, este obstáculo tem um padrão e possui medidas, conforme mostra a figura 3.6:

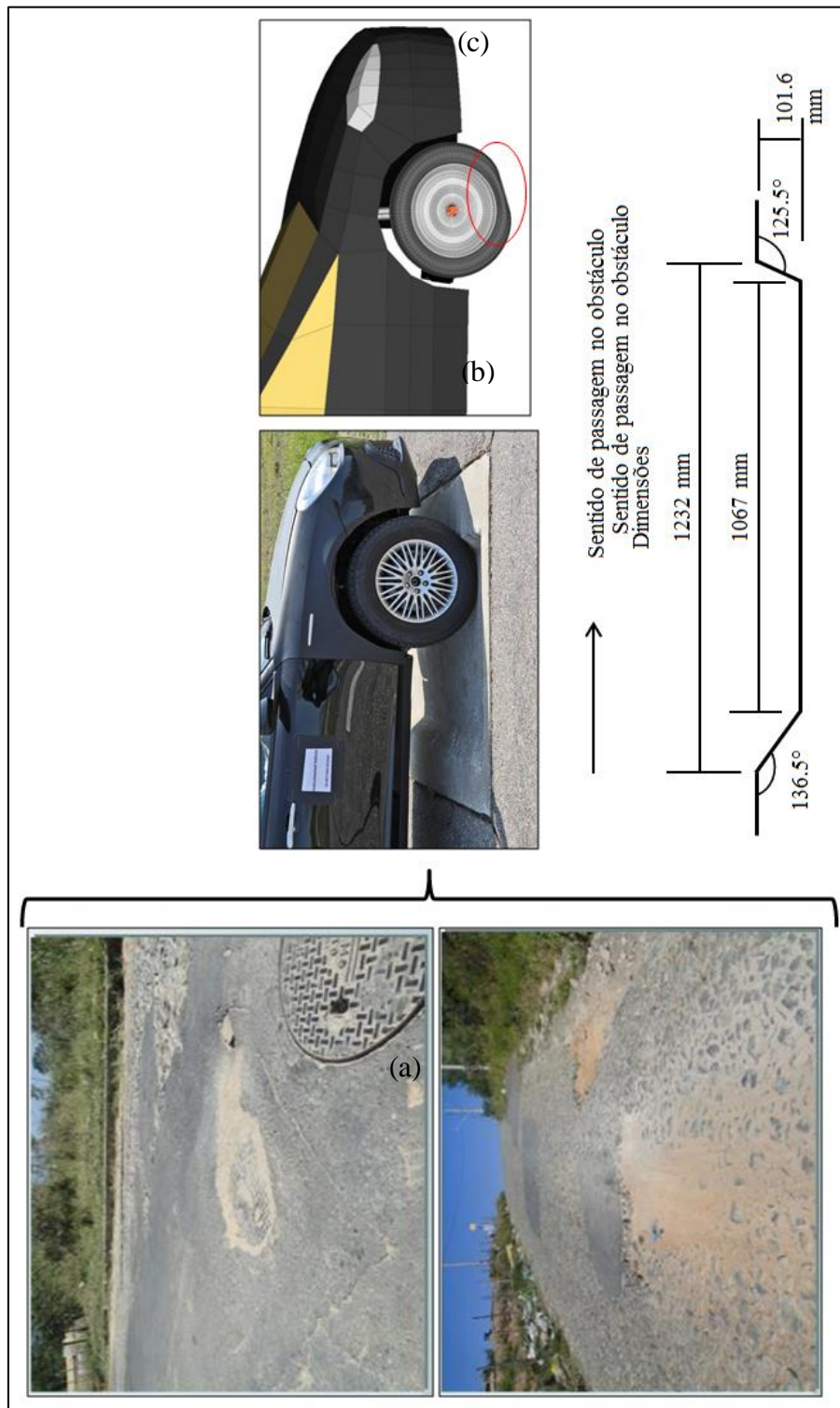


FIGURA 3.6 – Obstáculo *PotHole*. Exemplo de um carro passando sobre o *PotHole* e suas dimensões. (a) – Exemplos de buracos nas vias do percurso LDS; (b) – Prova experimental de passagem no obstáculo *PotHole*; (c) – Prova virtual de passagem no obstáculo *PotHole* com um modelo vRLDA. Destacado em vermelho a grande deformação provocada no pneu e conseqüentemente altas cargas longitudinais e verticais.

FONTE: Própria do autor

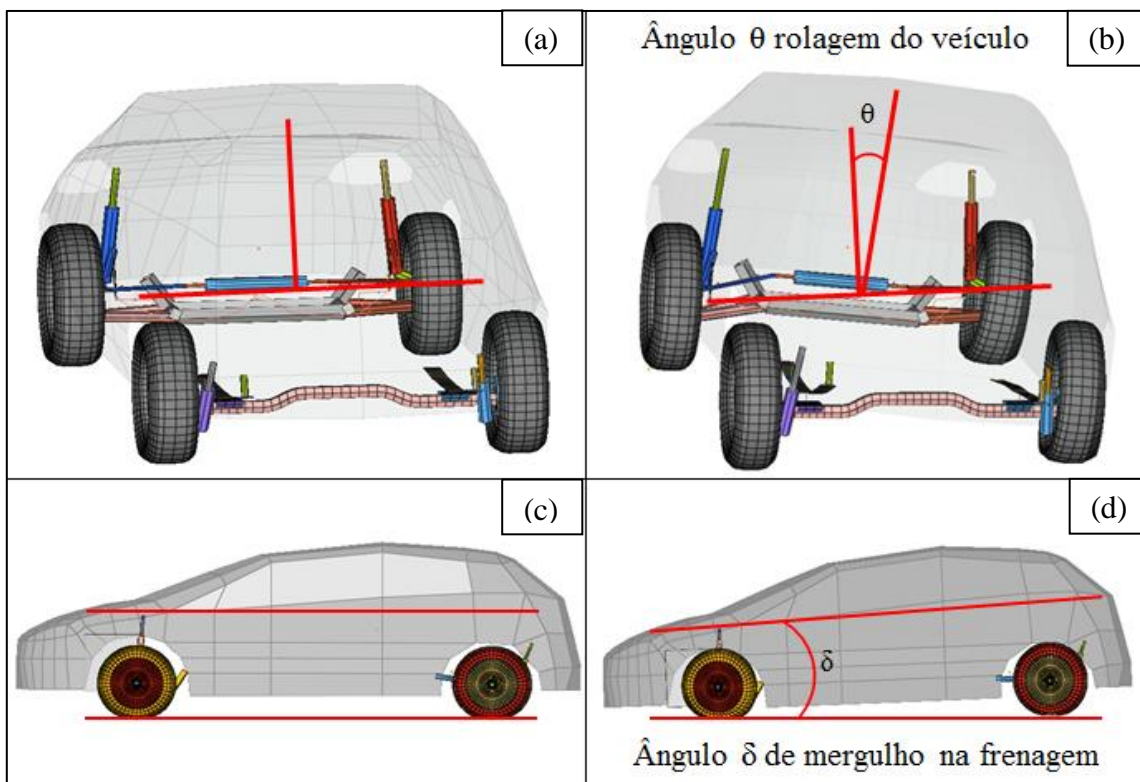


FIGURA 3.7 – Exemplos de manobras estáticas no modelo vRLDA para simulação das provas a banco (a) - veículo “parado”; (b) - veículo sob aceleração da gravidade $1g$ em $y+$ (curva a esquerda); (c) - veículo “parado”; (d) – veículo sob aceleração $1g$ longitudinal em $x-$ (frenagem).
 FONTE: Própria do autor.

De forma condensada, pôde se resumir todo o processo de geração de cargas da seguinte forma: Com os dados medidos do LDS e objetivos de vida a fadiga das provas a banco, calcula-se o dano acumulado para cada pista e teste a banco experimental. Com os modelos virtuais dos quatro projetos preparados, conforme tabela 1, executaram-se passagens em pistas digitalizadas *Pave Belga* a 60 km/h e *PotHole* a 40 km/h, veículos com capacidade máxima de carga como representação do LDS. Já as manobras de acelerações longitudinais e laterais, para representação das provas a banco. Com os resultados de histórias temporais das forças no centro roda para cada um dos modelos das manobras e passagens em pistas, calculou-se o dano total, após o processo de contagem de ciclos, e comparou-se com os danos acumulados das provas experimentais LDS e Provas a Banco. Desta forma, um percurso de fadiga virtual e suas devidas repetições representativo do LDS e Provas a Banco pôde ser então proposto e validado como representativo para componentes de chassi e carroceria simultaneamente.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Conforme **IVECO** (2017, p.1) afirma carros de passeio atualmente são quase na totalidade de construção do tipo monobloco, ou seja, o assoalho, as laterais e o teto formam uma peça única. As suspensões e seus componentes, a qual o presente trabalho se refere como chassi, são então fixadas ao monobloco. Desta forma, como o monobloco está apoiado na suspensão, entende-se que a transmissão de carga provenientes do pavimento para a carroceira se dá majoritariamente na direção vertical. Já as suspensões do veículo têm como função primordial, conforme **GILLESSPIE** (1992), fornecer conforto vertical (cargas verticais), reagir a forças providas do contato do pneu e pavimento em situações de frenagens e acelerações (forças longitudinais), manobras de curvas (forças laterais), resistir à rolagem do veículo (deslocamentos assimétricos da suspensão). Daí a necessidade dos percursos e repetições preverem as cargas nas três direções principais do veículo, conforme objetivos LDS e das Provas a Banco (que são baseadas em manobras verticais, laterais e longitudinais) para que o dimensionamento dos componentes das suspensões e a carroceria seja feito em fases virtuais de forma eficaz.

4.1 Resultados de Level Crossing das passagens em pistas virtuais e manobras estáticas

Juntamente com o LDS, para avaliação das suspensões do veículo, são feitas as Provas a Banco, já que o dano causado pelo LDS é majoritariamente vertical. Diante da severidade do percurso LDS e histórico dos veículos testados, entende-se que o LDS é o suficiente para validação quanto à durabilidade do veículo como um todo quando se trata de cargas verticais. Apesar de haver a prova a banco para fadiga vertical, conforme já abordado, esta não é utilizada para avaliação dos projetos mais recentes da FCA por entendimento que o LDS já é o suficiente para esta direção. Desta forma, no presente trabalho, para a criação dos percursos virtuais e repetições, para as cargas verticais, levou-se em conta os eventos e dano acumulado proveniente do LDS. Já para as cargas

longitudinais e laterais, a base para a criação dos percursos virtuais foram os danos acumulados das provas de Fadiga a Banco Laterais e Longitudinais e suas magnitudes de cargas. Com base nisso, conforme descrito na metodologia, às passagens nos percursos virtuais com os modelos vRLDA foram feitas de forma a se tentar aproximar ao máximo às características físicas dos pavimentos dos percursos do LDS, ou seja, percursos virtuais de calçamento de pedra e passagem em buracos padrão. Já para a representação das provas a banco (curvas e manobras de aceleração e frenagens), foram feitas manobras estáticas nos mesmos modelos, de aplicação de acelerações da gravidade nas direções longitudinais e laterais. Sendo assim, os sinais virtuais (sinais das passagens em pistas dos modelos vRLDA) temporais de força provenientes de uma passagem no *PotHole*, *Pave Belga*, um evento estático de aceleração e frenagem e um evento estático de curva (uma para direita e outra para esquerda), com o auxílio do software *Tecware*, foram comparados nas três direções com os sinais experimentais do LDS e Provas a Banco longitudinais e laterais. Os resultados dos *Level Crossings* são mostrados a seguir.

A seguir, no gráfico 4.1 são apresentados os resultados de *Level Crossing* da direção longitudinal de uma passagem no *PotHole*, *Pave Belga*, manobra estática lateral e longitudinal, do eixo dianteiro para o projeto 1, comparados com o *Level Crossing* da Prova de fadiga a banco longitudinal:

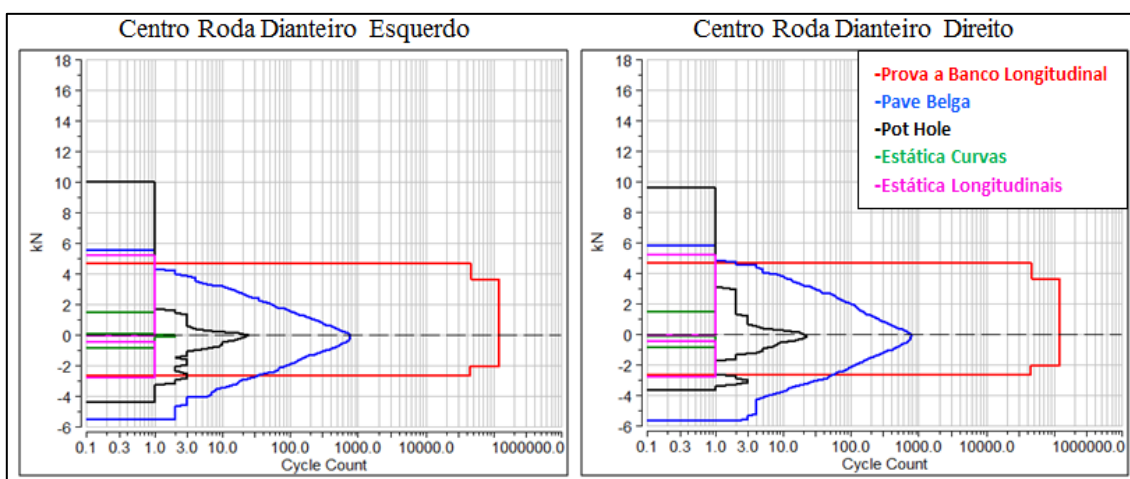


GRÁFICO 4.1 – Comparativo do *Level Crossing* resultante da história temporal das forças longitudinais do eixo dianteiro da prova de Fadiga a Banco longitudinal x passagens de pistas virtuais digitalizadas para o projeto 1.

O gráfico mostra que o evento de *PotHole* resulta em um evento de carga longitudinal positiva (sentido da frente para trás do veículo) de quase 100% da carga prevista para a prova de Fadiga a Banco longitudinal. Para o sentido longitudinal negativo (sentido de marcha do veículo) o *Pave Belga* resulta em picos de cargas superiores em cerca de 90% da prova a Banco Longitudinal. Os eventos estáticos de aceleração e frenagem possuem magnitudes de cargas semelhantes à prova experimental a Banco, como era esperado. A seguir o gráfico 4.2 mostra o comparativo do eixo dianteiro do projeto 2.

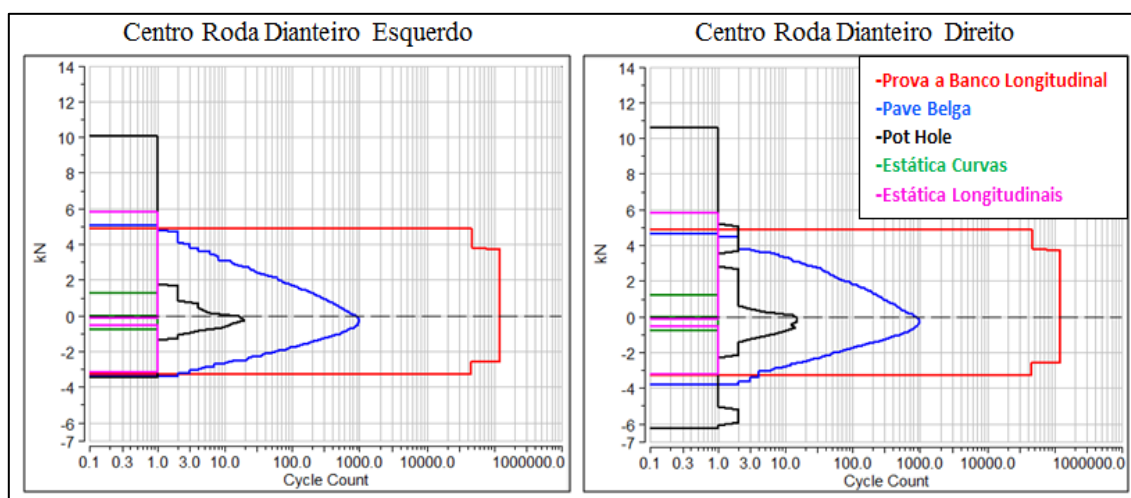


GRÁFICO 4.2 – Comparativo do Level Crossing resultante da história temporal das forças longitudinais do eixo dianteiro da prova de Fadiga a Banco longitudinal x passagens de pistas virtuais digitalizadas para o projeto 2.

De forma similar ao projeto 1, para a cargas longitudinal positivas, o *PotHole* segue mais severo com um evento de carga de 10.0 kN na roda dianteira esquerda enquanto a prova a Banco possui uma carga de 5.0kN prevista. Para o sentido negativo, a roda do lado esquerdo as magnitudes de cargas estão bem similares para todos os casos (virtuais e experimentais), já para o lado direito, o *PotHole* proporciona um pico de carga novamente de quase o dobro da prova física (evento de queda de roda). Os eventos estáticos de aceleração e frenagem possuem cargas equivalentes às provas a Banco. A seguir, no gráfico 4.3, o comparativo das cargas longitudinais do projeto 3.

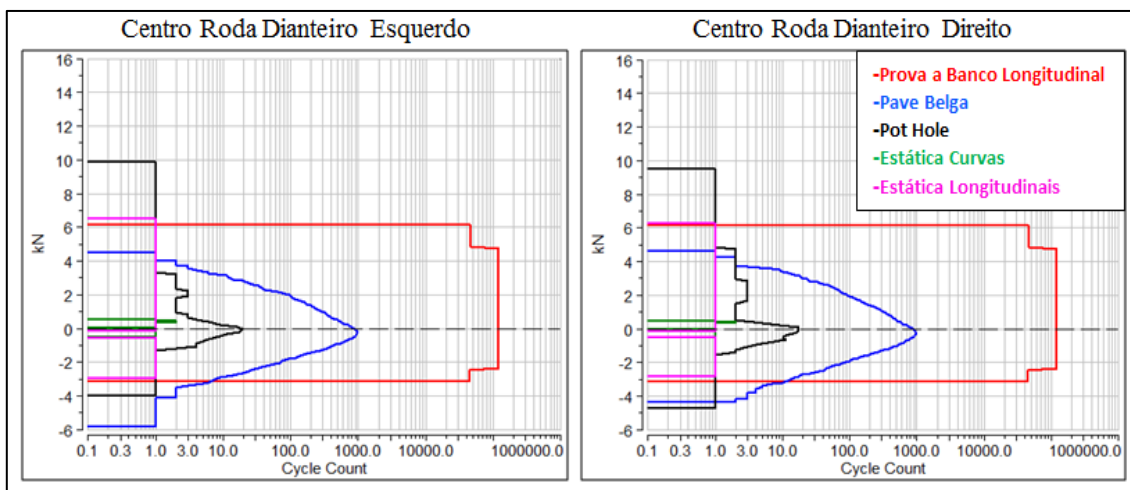


GRÁFICO 4.3 – Comparativo do Level Crossing resultante da história temporal das forças longitudinais do eixo dianteiro da prova de Fadiga a Banco longitudinal x passagens de pistas virtuais digitalizadas para o projeto 3.

O gráfico acima mostra um comportamento semelhante ao projeto 1 e 2. Na direção longitudinal sentido positivo, o *PotHole* proporciona um pico de carga maior em cerca de 60% no caso da roda dianteira esquerda. Já para o sentido negativo, lado esquerdo, o *Pave Belga* resulta em um evento de 6.0 kN enquanto a prova experimental a Banco possui uma carga de 3.0 kN. A seguir, na figura 4.4, o comparativo para o projeto 4.

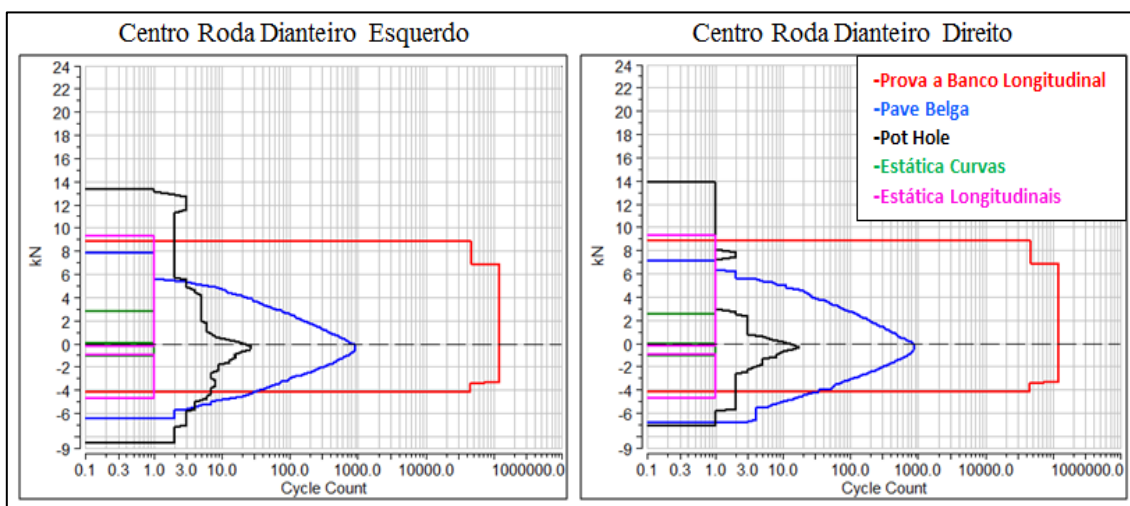


GRÁFICO 4.4 – Comparativo do Level Crossing resultante da história temporal das forças longitudinais do eixo dianteiro da prova de Fadiga a Banco longitudinal x passagens de pistas virtuais digitalizadas para o projeto 4.

Mantendo-se o padrão observado até aqui, o *PotHole*, possui um pico de carga de 14.0 kN no sentido positivo, enquanto a prova experimental a Banco prevê uma carga de 8.9kN. No sentido negativo, na roda dianteira esquerda, há dois eventos de cargas de

aproximadamente o dobro do valor experimental também provocado pelo *PotHole*. Novamente como esperado, as cargas virtuais longitudinais possuem magnitudes semelhantes às provas a Banco.

A seguir serão apresentados os comparativos das cargas resultantes laterais para os quatro projetos. Como base para comparação, levou-se em conta a prova de Fadiga experimental a Banco Lateral. Os gráficos 4.5 e 4.6 mostram os comparativos do eixo dianteiro e traseiro para o projeto 1:

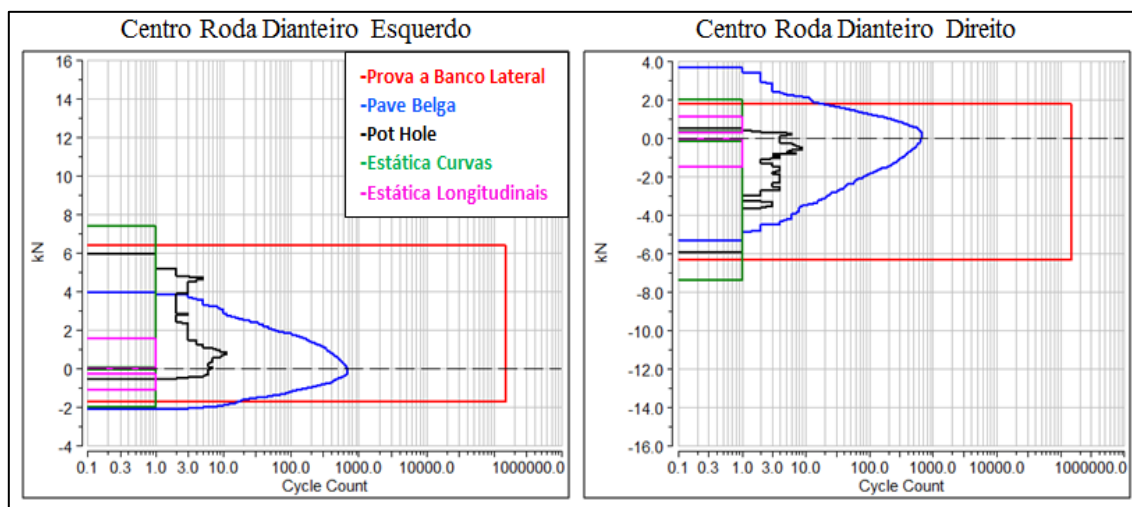


GRÁFICO 4.5 – Comparativo do Level Crossing resultante da história temporal das forças laterais do eixo dianteiro da prova de Fadiga a Banco lateral x passagens de pistas virtuais digitalizadas para o projeto 1.

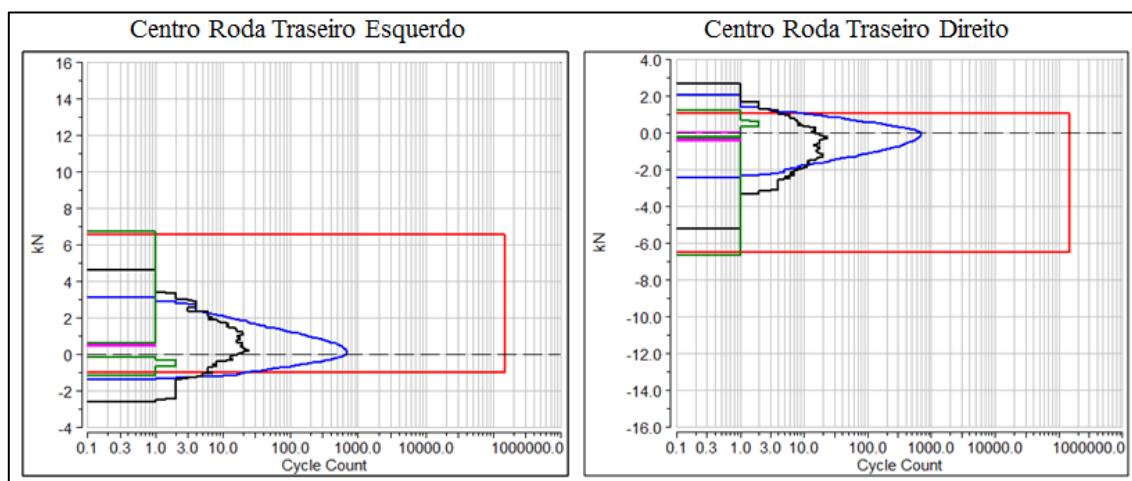


GRÁFICO 4.6 – Comparativo do Level Crossing resultante da história temporal das forças laterais do eixo traseiro da prova de Fadiga a Banco lateral x passagens de pistas virtuais digitalizadas para o projeto 1.

Como era esperado, os gráficos 4.5 e 4.6 mostram que as manobras estáticas de curvas são as responsáveis pelas maiores magnitudes de cargas nos centros das rodas externas as curvas, ou seja, quando o veículo está executando uma curva a esquerda, as rodas direitas estão sujeitas a maiores cargas laterais, já quando a curva é à direita, as rodas esquerdas são mais solicitadas. Os picos máximos de cargas laterais previstas na Fadiga Lateral a Banco, quando o lado é externo a curva, têm valores muito próximos em todas as rodas com os picos encontrados nas manobras estáticas virtuais. A maior diferença observada no projeto 1 é de aproximadamente 15% na roda dianteira esquerda. Quando o lado do veículo se torna interno a curva, os picos de cargas virtuais são devidos aos *PotHoles* no eixo traseiro e *Pave Belga* na dianteira. A seguir, os gráficos 4.7 e 4.8 apresentam os resultados das cargas laterais para o projeto 2.

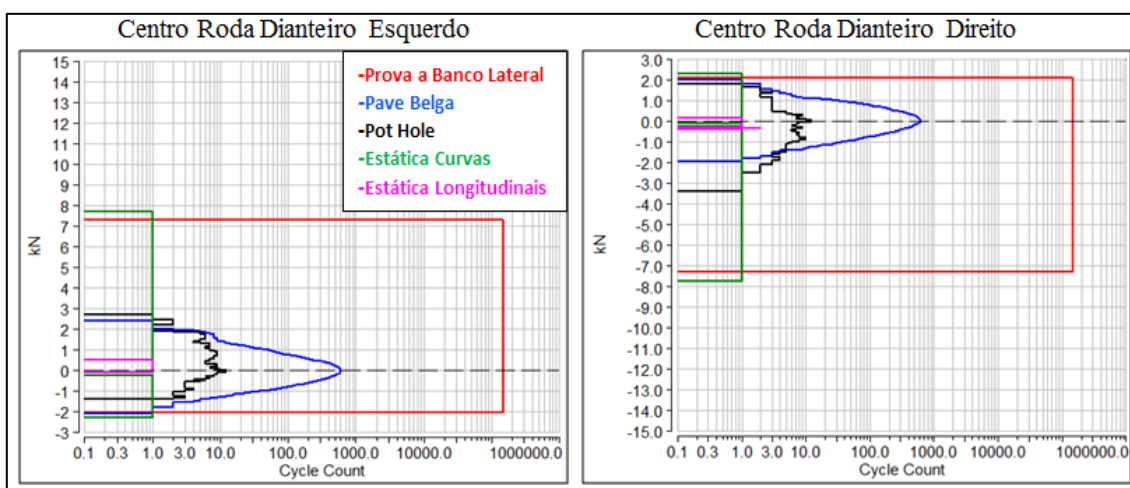


GRÁFICO 4.7 – Comparativo do Level Crossing resultante da história temporal das forças laterais do eixo dianteiro da prova de Fadiga a Banco lateral x passagens de pistas virtuais digitalizadas para o projeto 2.

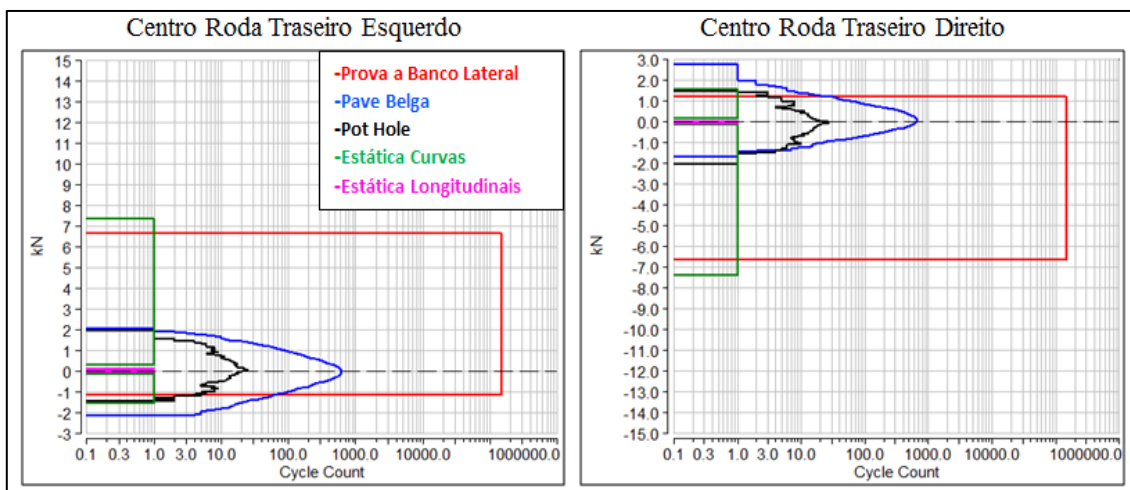


GRÁFICO 4.8 – Comparativo do Level Crossing resultante da história temporal das forças laterais do eixo traseiro da prova de Fadiga a Banco lateral x passagens de pistas virtuais digitalizadas para o projeto 2.

A carga da manobra estática de curva do modelo vRLDA, no eixo dianteiro, proporciona eventos de cargas laterais maiores dentre as pistas e manobras virtuais. Em comparação com a carga de fadiga a Banco Lateral, a força lateral da manobra estática de curva virtual é aproximadamente 8% maior quando se considera o lado externo à curva (eventos de maiores magnitudes em módulo) em ambos os eixos. Quando se analisa os eventos que acontecem do lado interno a curva (de menores magnitudes em módulo), o *Pave Belga* possui magnitudes de cargas maiores no eixo traseiro. As seguir, o comparativo das cargas laterais do projeto 3, nos gráficos 4.9 e 4.10.

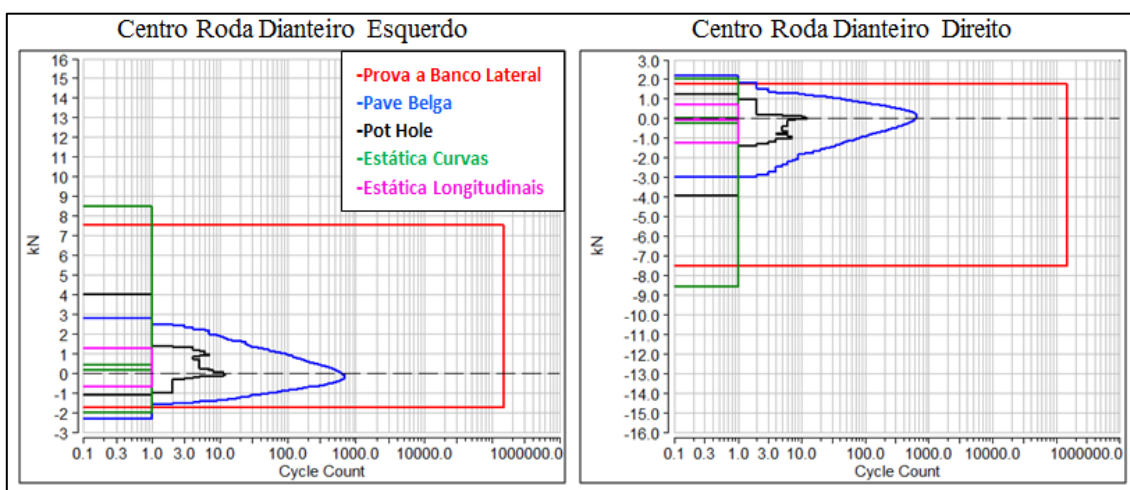


GRÁFICO 4.9 – Comparativo do Level Crossing resultante da história temporal das forças laterais do eixo dianteiro da prova de Fadiga a Banco lateral x passagens de pistas virtuais digitalizadas para o projeto 3.

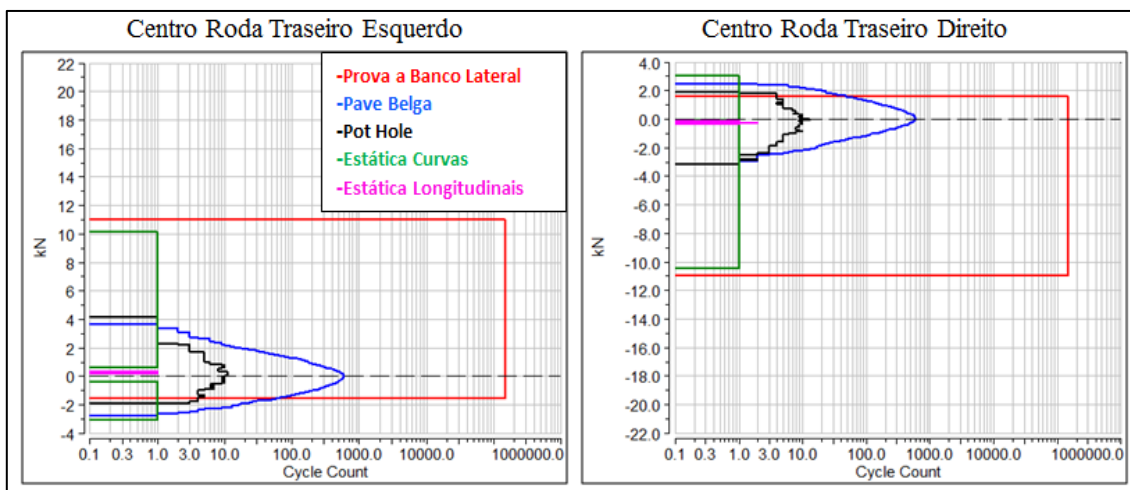


GRÁFICO 4.10 – Comparativo do Level Crossing resultante da história temporal das forças laterais do eixo traseiro da prova de Fadiga a Banco lateral x passagens de pistas virtuais digitalizadas para o projeto 3.

O lado esquerdo e direito do eixo traseiro do modelo vRLDA do projeto 3, apresentou picos de cargas laterais quando nos lados externos a curva menor em relação a carga prevista na Fadiga Lateral a Banco. A diferença máxima foi na roda traseira esquerda de 1% na magnitude da carga. Quando se analisa o lado interno a curva, as cargas resultantes dos eventos de curva possuem maiores magnitudes em módulo. A maior diferença é notada na roda traseira direita, 3.1kN virtual contra 1.9 kN experimental. Já para o eixo dianteiro, destacam-se as manobras virtuais de curva novamente, com amplitudes em módulo maiores cerca de 8% em ambos os lados em relação às cargas experimentais. E por último, os gráficos 4.11 e 4.12 apresentam os comparativos do projeto 4.

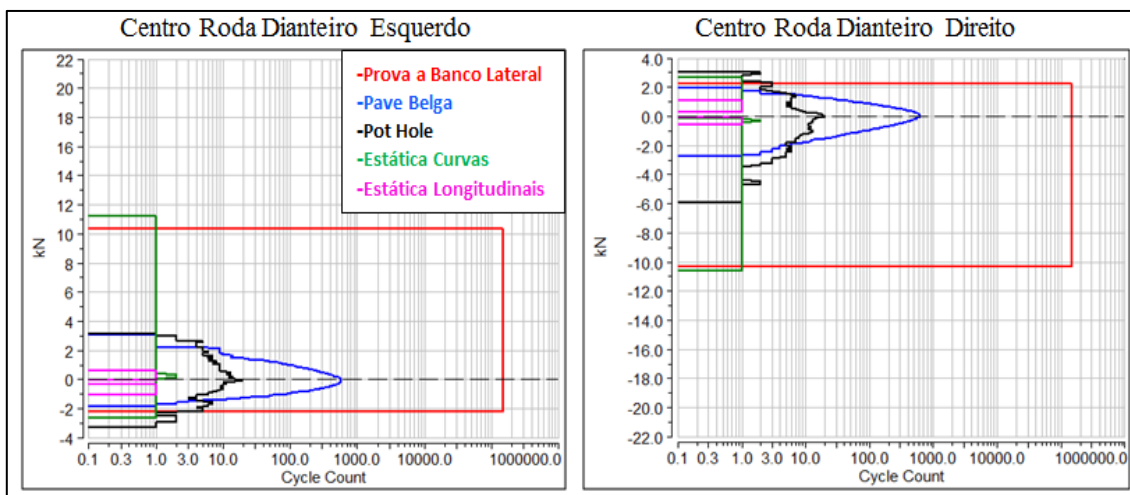


GRÁFICO 4.11 – Comparativo do Level Crossing resultante da história temporal das forças laterais do eixo dianteiro da prova de Fadiga a Banco lateral x passagens de pistas virtuais digitalizadas para o projeto 4.

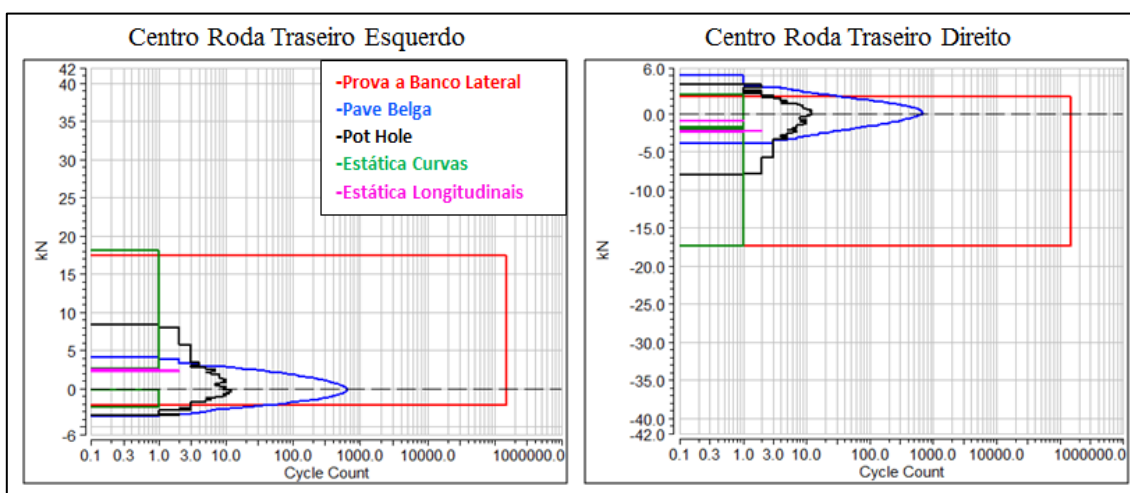


GRÁFICO 4.12 – Comparativo do Level Crossing resultante da história temporal das forças laterais do eixo traseiro da prova de Fadiga a Banco lateral x passagens de pistas virtuais digitalizadas para o projeto 4.

Para o projeto 4, os picos das cargas laterais provindas das manobras de curvas virtuais em ambos os eixos são superiores aos picos de cargas previstos para a prova experimental a Banco, no lado externo a curva (maiores magnitudes em módulo). A diferença máxima encontrada foi de aproximadamente 13% no centro roda dianteiro esquerdo. Quando se analisa o lado interno a curva, o *Pave Belga* é o responsável pelo maior evento de carga no eixo traseiro, com 5.0 kN na roda traseira direita. Já para o eixo dianteiro, o *PotHole* resulta em um evento de 3.5 kN na roda dianteira direita.

A seguir serão apresentados os resultados das forças resultantes verticais, que levam em consideração os resultados de histórico temporal de forças dos modelos vRLDA e os resultados de forças verticais do LDS. Os gráficos 4.13 e 4.14 apresentam o

comparativo entre as forças verticais resultantes das passagens de pistas virtuais e manobras estáticas e as forças verticais provenientes do LDS, para o eixo dianteiro e traseiro.

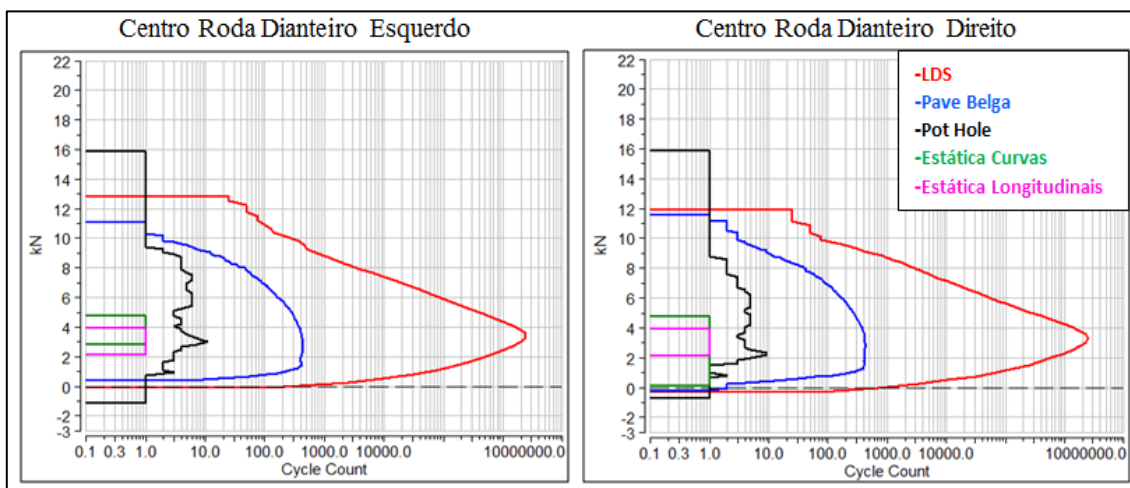


GRÁFICO 4.13 – Comparativo do Level Crossing resultante da história temporal das forças verticais do eixo dianteiro do LDS x passagens de pistas virtuais digitalizadas para o projeto 1.

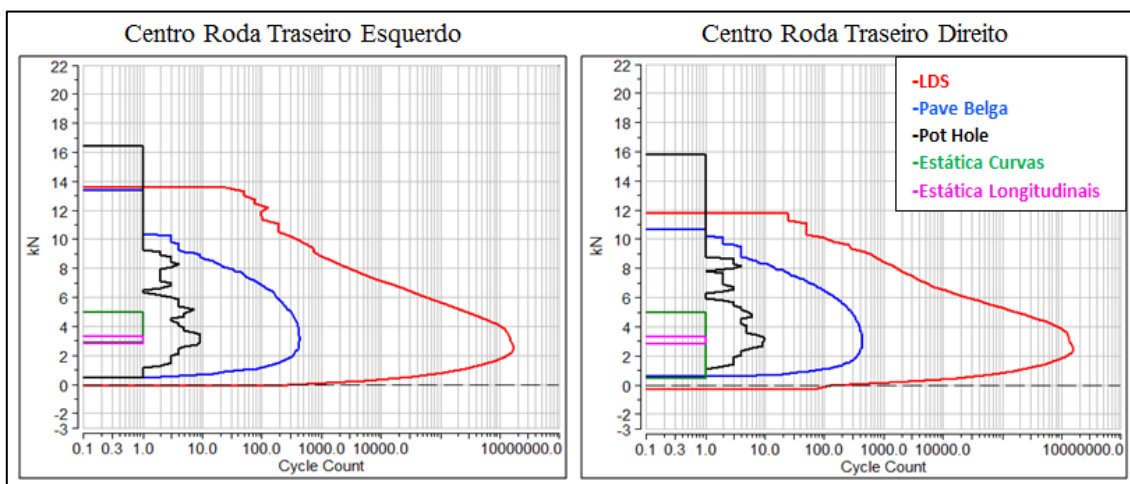


GRÁFICO 4.14 – Comparativo do Level Crossing resultante da história temporal das forças verticais do eixo traseiro do LDS x passagens de pistas virtuais digitalizadas para o projeto 1.

Pelos gráficos acima, é possível observar que o *PotHole* e *Pave Belga* são os responsáveis pelas maiores magnitudes de cargas verticais, sendo que o *PotHole* resulta em um único evento 34% maior que a maior magnitude do LDS, conforme a roda traseira direita. Já o *Pave Belga*, segue o mesmo perfil do LDS. As manobras estáticas resultam em magnitudes de cargas consideravelmente menores em relação ao LDS e os outros percursos virtuais. A seguir, os gráficos 4.15 e 4.16 o comparativo das forças verticais do projeto 2.

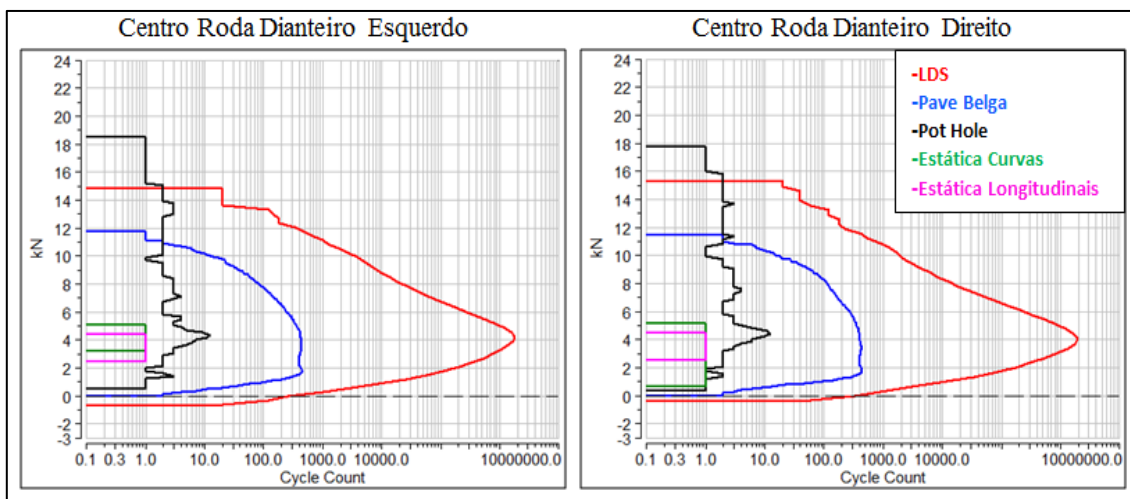


GRÁFICO 4.15 – Comparativo do Level Crossing resultante da história temporal das forças verticais do eixo dianteiro do LDS x passagens de pistas virtuais digitalizadas para o projeto 2.

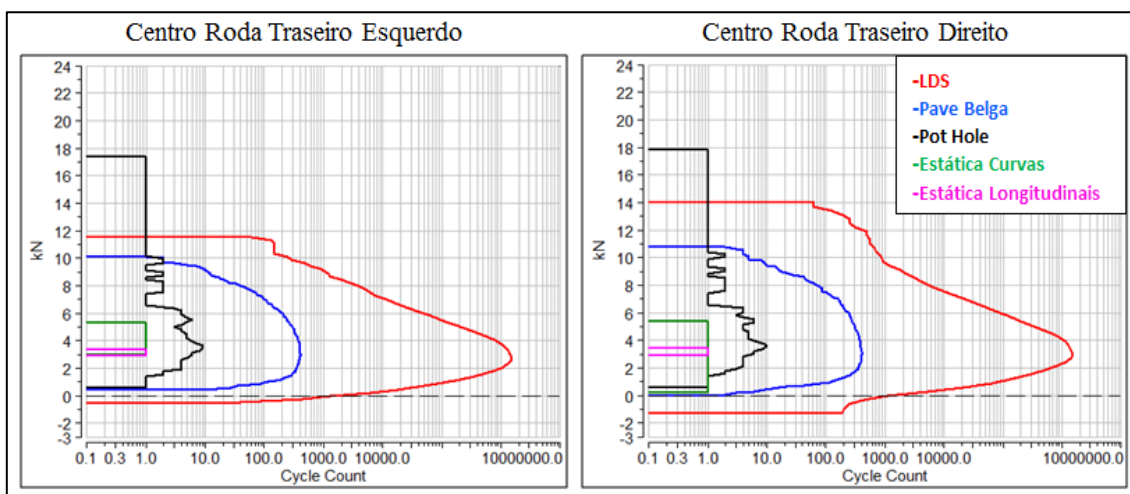


GRÁFICO 4.16 – Comparativo do Level Crossing resultante da história temporal das forças verticais do eixo traseiro do LDS x passagens de pistas virtuais digitalizadas para o projeto 2.

O projeto 2 apresenta um comportamento semelhante ao projeto 1 em relação as cargas verticais. Maior diferença encontrada do *PotHole* em relação ao LDS na magnitude de carga foi de 47% na roda traseira direita. Os gráficos 4.17 e 4.18 apresenta o comparativo para o projeto 3.

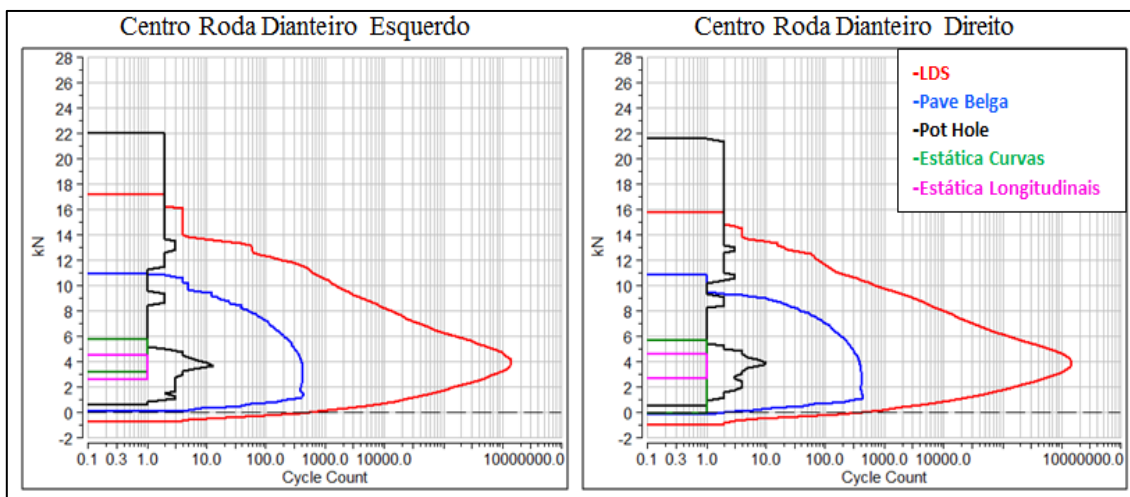


GRÁFICO 4.17 – Comparativo do Level Crossing resultante da história temporal das forças verticais do eixo dianteiro do LDS x passagens de pistas virtuais digitalizadas para o projeto 3.

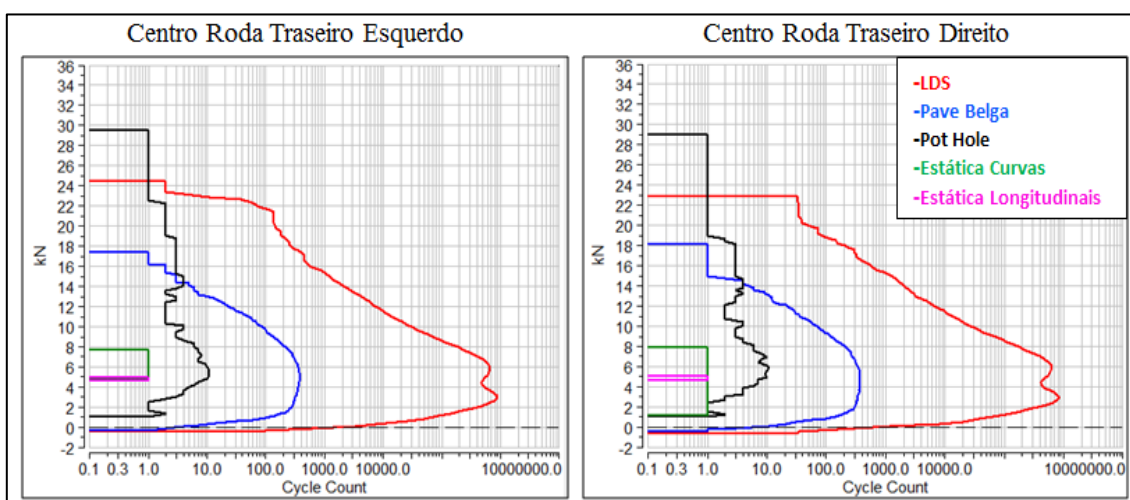


GRÁFICO 4.18 – Comparativo do Level Crossing resultante da história temporal das forças verticais do eixo traseiro do LDS x passagens de pistas virtuais digitalizadas para o projeto 3.

Como o projeto 1 e 2, as cargas verticais do *PotHole* para o projeto 3 possuem as maiores magnitudes de cargas, sendo que a diferença máxima entre o *PotHole* e o LDS acontece na roda dianteira direita de aproximadamente de 37%, sendo que o sinal virtual é o mais severo. Manobras estáticas de curvas e longitudinais, em relação a todas as outras possuem magnitudes inferiores. E finalmente a seguir, o comparativo das cargas verticais do projeto 4 nos gráficos 4.19 e 4.20.

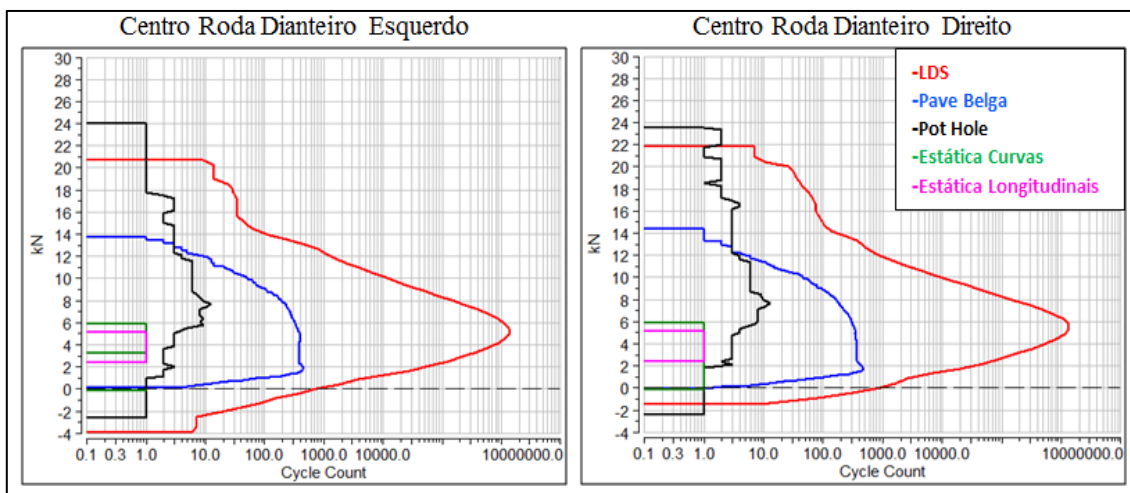


GRÁFICO 4.19 – Comparativo do Level Crossing resultante da história temporal das forças verticais do eixo dianteiro do LDS x passagens de pistas virtuais digitalizadas para o projeto 4.

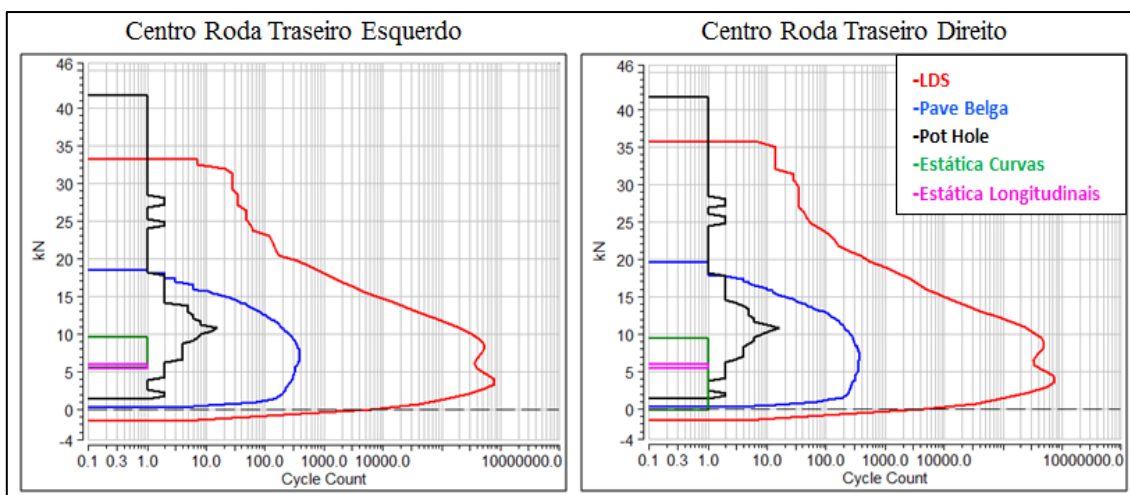


GRÁFICO 4.20 – Comparativo do Level Crossing resultante da história temporal das forças verticais do eixo traseiro do LDS x passagens de pistas virtuais digitalizadas para o projeto 4.

Com o mesmo padrão dos projetos anteriores, o projeto 4 também apresentou o maior pico de carga vertical para o *PotHole* seguido do *Pave Belga*. A maior diferença entre o LDS e *PotHole* foi de 27% na roda traseira esquerda. Observa-se no projeto 4, a maior diferença entre a magnitude máxima do sinal do *Pave Belga*, até a contagem de 1 ciclo no eixo traseiro, chegando no máximo de 35% de diferença.

Como resultados gerais, vale destacar que a adoção dos percursos do *PotHole* e *Pave Belga* virtuais, não só pela disponibilidade da pista virtual digitalizada, teve como principal objetivo a representação do LDS por sua característica severa das cargas verticais.

As magnitudes dos sinais verticais do *PotHole*, mesmo consideravelmente acima dos sinais experimentais, foram consideradas válidas pelo fato de que as magnitudes

principalmente das cargas verticais dos sinais LDS estão sujeitas a sofrerem grandes variações, pelos motivos já mencionados das peculiaridades de vias públicas. Tal discrepância dos resultados experimentais das cargas verticais do LDS, para um mesmo teste do veículo, é mostrada no Anexo A, que apresenta os resultados de *level Crossing* dos sinais temporais resultantes das diferentes passagens de cada projeto conforme tabelas A1, A2, A3 e A4. Ainda de acordo com o Anexo A, é possível verificar que em alguns casos, eventos extremos podem acarretar em um pico de carga até 69.9% maior em relação a uma passagem subsequente no mesmo percurso com o mesmo veículo. Além disso, procurou-se, na simulação do *PotHole*, uma velocidade de passagem de forma que as magnitudes encontradas de cargas verticais fossem maiores do que as do LDS para segurança na predição de cargas. Já os sinais resultantes do *Pave Belga* obtiveram um perfil de cargas semelhantes ao LDS. Apesar das desvantagens do LDS já mencionadas na revisão bibliográfica, este foi ainda escolhido como base para formulação do bloco virtual de fadiga por ser a estratégia utilizada para avaliação da durabilidade experimental dos veículos.

De fato, esperava-se que as magnitudes das cargas resultantes virtuais longitudinais fossem maiores em relação às cargas previstas para as provas de fadiga a Banco Longitudinal, justamente pelos eventos de *PotHole* e *Pave Belga*, já que estes no estudo das cargas verticais foram considerados válidos. Desta forma, para a composição do número de repetições final proposto no bloco de fadiga virtual, naturalmente levou-se em conta também os eventos de magnitudes de carga provenientes do *PotHole* e *Pave Belga*. Com foco na durabilidade, esta consideração é importante visto que a ordem dos diferentes carregamentos (amplitudes diferentes) possui efeito considerável na vida a fadiga (conforme já relatado no presente trabalho). Em outras palavras, o bloco virtual proposto mesclará a severidade dos eventos longitudinais do LDS (calçamento de pedra e buracos) com o número de ciclos e conseqüentemente o dano acumulado da prova de fadiga a Banco Longitudinal.

Para a direção y, a prova a banco de Fadiga Lateral leva em conta acelerações laterais do veículo em curvas da ordem de 0.5g a 1.0g. Estas magnitudes de acelerações são normalmente atingidas em manobras de curvas quase estáticas severas as quais geram por consequência consideráveis cargas laterais principalmente nas rodas externas a curva. Desta forma, era esperado que as amplitudes de cargas laterais (rodas externas a curva) previstos nas provas a banco laterais fossem alcançados somente pela manobra

estática de curva nos modelos vRLDA. De fato, isto é observado nos comparativos de cargas laterais apresentado.

4.2 Número de repetições e bloco de fadiga virtual isodano às provas experimentais

Com os percursos e manobras virtuais considerados representativos, como amplitudes e magnitudes, das provas experimentais de durabilidade, foi proposto um número de repetições para cada percurso e manobra no qual o dano acumulado dos percursos e manobras virtuais seja equivalentes ao dano total acumulado das provas experimentais base. Foi calculado primeiramente o número de repetições para a formação do bloco único para as cargas verticais. É possível observar através dos gráficos 4.1 ao 4.20 que uma passagem no percurso virtual do *Pave Belga* resulta em várias amplitudes de cargas com variados números de ciclos (a maioria deles correspondem ao peso por roda), ao invés dos eventos de manobras estáticas, as quais resultam em eventos únicos de picos de cargas, bem como o *PotHole* que consiste em um pico único de alta magnitude e outros com magnitudes baixas e poucos ciclos. Ainda de acordo com os *Level Crossings* dos gráficos 4.1 ao 4.20, para os quatro projetos analisados, a magnitude máxima de forças vertical do LDS não ultrapassam 70 ciclos (projeto 2 – roda traseira esquerda), ou seja, têm-se no máximo 70 vezes o pico de carga na contagem de ciclos resultante da história temporal dos quatro projetos. Desta forma, o número de repetições do sinal do *PotHole* para formação do bloco final será 70. Para o ajuste das repetições do sinal do *Pave Belga*, subtraiu-se do dano total do LDS, o dano do *PotHole* multiplicado por 70 e então se dividiu o resultado pelo dano acumulado de uma passagem do *Pave Belga*. A equação a seguir, visa simplificar a forma de obtenção do número de repetições para o sinal do *Pave Belga*:

$$n \times \text{Pave Belga} = \frac{\text{LDS} - 70 \times \text{Pot Hole}}{1 \times \text{Pave Belga}} \quad (4.1)$$

A tabela 4.1 apresenta os valores dos números de repetições encontrados por roda para cada projeto para o *Pave Belga*:

TABELA 4.1
Cálculo número de repetições para o *Pave Belga* para direção vertical

Dano Acumulado calculado <i>Tecware</i> - Direção Vertical Projeto 1				
	Dianteiro Esquerdo	Dianteiro Direito	Traseiro Esquerdo	Traseiro Direito
LDS	1.739E-19	1.449E-19	1.253E-19	6.739E-20
1 x <i>Pave Belga</i>	5.451E-22	5.686E-22	3.706E-22	2.535E-22
1 x <i>PotHole</i>	3.036E-22	2.557E-22	2.104E-22	1.745E-22
70 x <i>PotHole</i>	2.125E-20	1.790E-20	1.473E-20	1.222E-20
Número de repetições sinal do <i>Pave Belga</i> - Projeto 1				
n x <i>Pave Belga</i>	280	223	298	218
Dano Acumulado calculado <i>Tecware</i> - Direção Vertical Projeto 2				
	Dianteiro Esquerdo	Dianteiro Direito	Traseiro Esquerdo	Traseiro Direito
LDS	2.942E-19	2.474E-19	1.166E-19	1.741E-19
1 x <i>Pave Belga</i>	8.805E-22	1.051E-21	3.814E-22	5.869E-22
1 x <i>PotHole</i>	3.915E-22	3.318E-22	2.753E-22	3.189E-22
70 x <i>PotHole</i>	2.740E-20	2.322E-20	1.927E-20	2.232E-20
Número de repetições sinal do <i>Pave Belga</i> - Projeto 2				
n x <i>Pave Belga</i>	303	213	255	259
Dano Acumulado calculado <i>Tecware</i> - Direção Vertical Projeto 3				
	Dianteiro Esquerdo	Dianteiro Direito	Traseiro Esquerdo	Traseiro Direito
LDS	1.878E-19	1.497E-19	8.732E-19	7.175E-19
1 x <i>Pave Belga</i>	6.873E-22	5.756E-22	3.365E-21	3.291E-21
1 x <i>PotHole</i>	9.242E-22	8.659E-22	3.992E-21	3.549E-21
Dano 70 x <i>PotHole</i>	6.470E-20	6.061E-20	2.794E-19	2.484E-19
Número de repetições sinal do <i>Pave Belga</i> - Projeto 3				
n x <i>Pave Belga</i>	179	155	176	143
Dano Acumulado calculado <i>Tecware</i> - Direção Vertical Projeto 4				
	Dianteiro Esquerdo	Dianteiro Direito	Traseiro Esquerdo	Traseiro Direito
LDS	4.792E-19	4.136E-19	2.234E-18	2.491E-18
1 x <i>Pave Belga</i>	2.059E-21	1.864E-21	9.230E-21	1.011E-20
1 x <i>PotHole</i>	2.855E-21	2.628E-21	2.208E-20	2.224E-20
Dano 70 x <i>PotHole</i>	1.998E-19	1.839E-19	1.546E-18	1.557E-18
Número de repetições sinal do <i>Pave Belga</i> - Projeto 4				
n x <i>Pave Belga</i>	136	123	75	92

De acordo com a tabela 4.1 acima, o maior número de repetições para que se tenha no mínimo o dano acumulado vertical (somado ao dano de 70 repetições do *PotHole*), equivalente ao dano do LDS são 303 repetições (em vermelho na tabela) para o caso do projeto 2 na roda dianteira esquerda.

Até aqui, os danos verticais das manobras longitudinais e laterais não foram considerados. O acréscimo destes serão feitos no bloco final quando o número de repetições das manobras estáticas for determinado.

A seguir, utilizando as repetições determinadas para o *PotHole* e *Pave Belga*, foi calculado o número de repetições para o bloco de fadiga virtual longitudinal com dano acumulado equivalente a prova de Fadiga Longitudinal a Banco. Seguindo de forma semelhante à forma do cálculo vertical, foram somados os danos acumulados na direção longitudinal de 70 passagens do *PotHole*, 303 passagens no *Pave Belga*, e subtraídos do dano acumulado na prova de Fadiga a Banco Longitudinal, conforme mostra a equação 4.2. Desta diferença, dividiu-se o dano longitudinal de uma manobra estática longitudinal e determinou-se o número de repetições necessárias para a manobra para cada projeto e para cada roda.

$$n \times \text{Man Longitudinal} = \frac{\text{Prova a Banco Lon.} - (303 \times \text{Pave Belga} + 70 \times \text{PotHole})}{1 \times \text{Man Longitudinal}} \quad (4.2)$$

A tabela 4.2 apresenta os resultados encontrados para cada projeto:

TABELA 4.2
Cálculo número de repetições de manobras de acelerações e frenagens

Dano Acumulado calculado <i>Tecware</i> - Direção Longitudinal - Projeto 1				
	Dianteiro Esquerdo	Dianteiro Direito	Traseiro Esquerdo	Traseiro Direito
Prova a Banco longitudinal	2.890E-19	2.890E-19	-	-
1 x <i>Pave Belga</i> (longitudinal)	1.076E-22	1.651E-22	-	-
1 x <i>PotHole</i> (longitudinal)	1.283E-22	8.412E-23	-	-
1 x manobra acel. e fren.	6.679E-24	6.813E-24	-	-
Dano 303 x <i>Pave Belga</i>	3.259E-20	1.156E-20	-	-
Dano 70 x <i>PotHole</i>	8.979E-21	2.549E-20	-	-
Número de repetições sinal da Manobra de Aceleração e Frenagem - Direção Longitudinal				
<i>n x</i> Manobra Longitudinal	37046	36984	-	-
Dano Acumulado calculado <i>Tecware</i> - Direção Longitudinal - Projeto 2				
	Dianteiro Esquerdo	Dianteiro Direito	Traseiro Esquerdo	Traseiro Direito
Prova a Banco longitudinal	4.849E-19	4.849E-19	-	-
1 x <i>Pave Belga</i> (longitudinal)	5.731E-23	7.144E-23	-	-
1 x <i>PotHole</i> (longitudinal)	9.274E-23	2.762E-22	-	-
1 x manobra acel. e fren.	1.246E-23	1.308E-23	-	-
Dano 303 x <i>Pave Belga</i>	1.736E-20	2.165E-20	-	-
Dano 70 x <i>PotHole</i>	6.492E-21	1.934E-20	-	-
Número de repetições sinal da Manobra de Aceleração e Frenagem - Direção Longitudinal				
<i>n x</i> Manobra Longitudinal	36989	33933	-	-
Dano Acumulado calculado <i>Tecware</i> - Direção Longitudinal - Projeto 3				
	Dianteiro Esquerdo	Dianteiro Direito	Traseiro Esquerdo	Traseiro Direito
Prova a Banco longitudinal	9.224E-19	9.224E-19	-	-
1 x <i>Pave Belga</i> (longitudinal)	8.172E-23	9.572E-23	-	-
1 x <i>PotHole</i> (longitudinal)	1.061E-22	1.191E-22	-	-
1 x manobra acel. e fren.	1.576E-23	1.318E-23	-	-
Dano 303 x <i>Pave Belga</i>	2.476E-20	2.900E-20	-	-
Dano 70 x <i>PotHole</i>	7.428E-21	8.337E-21	-	-
Número de repetições sinal da Manobra de Aceleração e Frenagem - Direção Longitudinal				
<i>n x</i> Manobra Longitudinal	56500	67146	-	-
Dano Acumulado calculado <i>Tecware</i> - Direção Longitudinal - Projeto 4				
	Dianteiro Esquerdo	Dianteiro Direito	Traseiro Esquerdo	Traseiro Direito
Prova a Banco longitudinal	5.127E-18	5.127E-18	-	-
1 x <i>Pave Belga</i> (longitudinal)	6.509E-22	7.896E-22	-	-
1 x <i>PotHole</i> (longitudinal)	1.252E-21	8.313E-22	-	-
1 x manobra acel. e fren.	1.106E-22	1.122E-22	-	-
Dano 303 x <i>Pave Belga</i>	1.972E-19	2.393E-19	-	-
Dano 70 x <i>PotHole</i>	8.766E-20	5.819E-20	-	-
Número de repetições sinal da Manobra de Aceleração e Frenagem - Direção Longitudinal				
<i>n x</i> Manobra Longitudinal	43782	43046	-	-

Da tabela 4.2 acima, o número necessário de repetições das manobras longitudinais, de forma a cobrir todos as rodas é de 67146 repetições.

E por fim, com os valores de repetições do *PotHole*, *Pave Belga* e manobras Longitudinais foram calculadas o número de repetições para as manobras estáticas de curvas, que resulte em um dano equivalente à Prova de Fadiga a Banco Lateral. De forma semelhante até aqui, foi subtraído do dano acumulado da prova experimental de fadiga Lateral a Banco, o somatório do dano acumulado lateral causado pelas manobras longitudinais, *Pave Belga* e *PotHole* com suas respectivas repetições. Desta subtração, dividiu-se pelo dano resultante de uma manobra estática de curva, conforme ilustra a equação 4.3. A tabela 4.3 mostra os resultados de repetições de curvas para cada projeto.

$$n \times \text{Man Lateral} = \frac{\text{Prova a Banco Lat.} - (303 \times \text{Pave Belga} + 70 \times \text{PotHole} + 67146 \times \text{Long.})}{1 \times \text{Man.Lateral}} \quad (4.3)$$

TABELA 4.3
Cálculo número de repetições de manobras de curvas

Número de repetições – Direção Y - Lateral - Projeto 1				
	Dianteiro Esquerdo	Dianteiro Direito	Traseiro Esquerdo	Traseiro Direito
Prova a Banco Lateral	1.074E-18	1.074E-18	7.527E-19	7.527E-19
1 x <i>Pave Belga</i> (lateral)	2.309E-23	5.696E-23	2.719E-24	1.638E-24
1 x <i>PotHole</i> (lateral)	2.412E-24	2.279E-24	4.486E-24	6.584E-24
1 x manobra acel. e fren. (lateral)	2.736E-26	2.748E-26	3.381E-30	3.449E-30
1 x Manobra Curva	1.451E-23	1.480E-23	6.220E-24	6.233E-24
Dano 303 x <i>Pave Belga</i>	6.996E-21	1.726E-20	8.238E-22	4.963E-22
Dano 70 x <i>PotHole</i>	1.688E-22	1.595E-22	3.140E-22	4.609E-22
Dano 67146 x Man. Longitudinal	1.837E-21	1.845E-21	2.270E-25	2.316E-25
n x Manobra Laterais	73399	71282	120831	120604

Número de repetições – Direção Y – Lateral - Projeto 2				
	Dianteiro Esquerdo	Dianteiro Direito	Traseiro Esquerdo	Traseiro Direito
Prova a Banco Lateral	2.202E-18	2.202E-18	8.918E-19	8.918E-19
1 x <i>Pave Belga</i> (lateral)	1.597E-24	1.011E-24	3.255E-24	1.092E-24
1 x <i>PotHole</i> (lateral)	2.932E-25	8.132E-25	1.436E-25	1.711E-25
1 x Manobra acel. e fren. (lateral)	2.284E-29	9.112E-30	6.574E-32	1.598E-33
1 x Manobra Curva	2.010E-23	2.133E-23	1.112E-23	1.171E-23
Dano 303 x <i>Pave Belga</i>	4.839E-22	3.065E-22	9.862E-22	3.309E-22
Dano 70 x <i>PotHole</i>	2.053E-23	5.692E-23	1.005E-23	1.198E-23
Dano 67146 x Man. Longitudinal	1.534E-24	6.118E-25	4.414E-27	1.073E-28
n x Manobra Laterais	109534	103227	80090	76127
Dano Acumulado calculado <i>Tecware</i> - Direção Lateral - Projeto 3				
	Dianteiro Esquerdo	Dianteiro Direito	Traseiro Esquerdo	Traseiro Direito
Prova a Banco Lateral	2.125E-18	2.125E-18	9.486E-18	9.486E-18
1 x <i>Pave Belga</i> (lateral)	2.969E-24	2.876E-24	1.302E-23	9.607E-24
1 x <i>PotHole</i> (lateral)	7.240E-25	7.664E-25	1.781E-24	7.461E-25
1 x Manobra acel. e fren. (lateral)	6.416E-27	5.565E-27	2.069E-32	2.324E-32
1 x Manobra Curva	2.597E-23	2.711E-23	8.252E-23	9.283E-23
Dano 303 x <i>Pave Belga</i>	8.998E-22	8.715E-22	3.944E-21	2.911E-21
Dano 70 x <i>PotHole</i>	5.068E-23	5.365E-23	1.247E-22	5.223E-23
Dano 67146 x Man. Longitudinal	4.308E-22	3.736E-22	1.389E-27	1.561E-27
n x Manobra Laterais	81772	78345	114909	102164
Dano Acumulado calculado <i>Tecware</i> - Direção Lateral - Projeto 4				
	Dianteiro Esquerdo	Dianteiro Direito	Traseiro Esquerdo	Traseiro Direito
Prova a Banco Lateral	9.763E-18	9.763E-18	8.990E-17	8.990E-17
1 x <i>Pave Belga</i> (lateral)	2.798E-24	2.410E-24	4.675E-23	5.329E-23
1 x <i>PotHole</i> (lateral)	3.087E-24	1.337E-23	5.834E-23	5.779E-23
1 x Manobra acel. e fren. (lateral)	2.446E-27	2.418E-27	1.392E-27	1.384E-27
1 x Manobra Curva	1.075E-22	8.595E-23	7.395E-22	6.322E-22
Dano 303 x <i>Pave Belga</i>	8.477E-22	7.301E-22	1.417E-20	1.615E-20
Dano 70 x <i>PotHole</i>	2.161E-22	9.358E-22	4.084E-21	4.045E-21
Dano 67146 x Man. Longitudinal	1.642E-22	1.624E-22	9.348E-23	9.294E-23
n x Manobra Laterais	90844	113570	121538	142164

Chegou-se ao valor de 142164 repetições para curvas. Desta forma, chega-se inicialmente no número de repetições a seguir:

- 70 x o sinal do *PotHole*;
- 303 x o sinal do *Pave Belga*;

- 67140 x Manobras Longitudinais;
- 142164 x Manobras de Curvas.

Ressalta-se que uma manobra Longitudinal e 1 manobra de curva referem-se a uma aceleração e uma frenagem, e uma curva à direita e outra à esquerda, respectivamente. Quando comparados os valores de repetições das manobras estáticas de curvas com os valores dos percursos de *PotHole* e *Pave Belga*, estes possuem grandes discrepâncias pelo fato do sinal virtual do *Pave Belga* corresponder a uma passagem em pista física de 400 metros. Já o *PotHole* foi utilizado como eventos para o alcance de magnitudes de cargas. Com estas repetições, inicialmente, foi calculado a severidade do dano acumulado virtual em relação ao dano das provas experimentais, ou seja, em quanto o dano acumulado em cada direção está mais severo em relação ao dano experimental. As tabelas 4.4, 4.5 e 4.6 mostram os comparativos:

TABELA 4.4
Severidade do dano acumulado Vertical entre bloco virtual e provas experimentais

Relação entre Dano Total Acumulado Direção Vertical Projeto 1				
	Dianteiro Esquerdo	Dianteiro Direito	Traseiro Esquerdo	Traseiro Direito
<i>PotHole</i>	2.125E-20	1.790E-20	1.473E-20	1.222E-20
Pave Belga	1.652E-19	1.723E-19	1.123E-19	7.680E-20
Man. Longitudinais	2.691E-22	2.738E-22	3.432E-22	3.507E-22
Man. Curvas	6.432E-20	6.399E-20	5.563E-20	5.581E-20
Total dano acumulado Virtual	2.510E-19	2.544E-19	1.830E-19	1.452E-19
Total LDS (Direção Vertical)	1.739E-19	1.449E-19	1.253E-19	6.739E-20
Bloco Virtual/LDS	1.4	1.8	1.5	2.2
Relação entre Dano Total Acumulado Direção Vertical Projeto 2				
	Dianteiro Esquerdo	Dianteiro Direito	Traseiro Esquerdo	Traseiro Direito
<i>PotHole</i>	2.740E-20	2.322E-20	1.927E-20	2.232E-20
Pave Belga	2.668E-19	3.185E-19	1.156E-19	1.778E-19
Man. Longitudinais	3.781E-22	3.875E-22	5.694E-22	6.298E-22
Man. Curvas	5.299E-20	5.188E-20	1.096E-19	1.074E-19
Total dano acumulado Virtual	3.476E-19	3.940E-19	2.450E-19	3.082E-19
Total LDS (Direção Vertical)	2.942E-19	2.474E-19	1.166E-19	1.741E-19
Bloco Virtual/LDS	1.2	1.6	2.1	1.8
Relação entre Dano Total Acumulado Direção Vertical Projeto 3				
	Dianteiro Esquerdo	Dianteiro Direito	Traseiro Esquerdo	Traseiro Direito
<i>PotHole</i>	6.470E-20	6.061E-20	2.794E-19	2.484E-19
Pave Belga	2.082E-19	1.744E-19	1.020E-18	9.973E-19
Man. Longitudinais	3.727E-22	3.784E-22	1.746E-21	1.885E-21
Man. Curvas	1.926E-19	1.817E-19	4.193E-19	4.150E-19
Total dano acumulado Virtual	4.659E-19	4.171E-19	1.720E-18	1.663E-18
Total LDS (Direção Vertical)	1.878E-19	1.497E-19	8.732E-19	7.175E-19
Bloco Virtual/LDS	2.5	2.8	2.0	2.3
Relação entre Dano Total Acumulado Direção Vertical Projeto 4				
	Dianteiro Esquerdo	Dianteiro Direito	Traseiro Esquerdo	Traseiro Direito
<i>PotHole</i>	1.998E-19	1.839E-19	1.546E-18	1.557E-18
Pave Belga	6.239E-19	5.649E-19	2.797E-18	3.062E-18
Man. Longitudinais	4.972E-21	5.005E-21	9.616E-21	9.707E-21
Man. Curvas	2.410E-19	2.394E-19	2.081E-18	2.353E-18
Total dano acumulado Virtual	1.070E-18	9.932E-19	6.433E-18	6.981E-18
Total LDS (Direção Vertical)	4.792E-19	4.136E-19	2.234E-18	2.491E-18
Bloco Virtual/LDS	2.2	2.4	2.9	2.8

TABELA 4.5
Severidade do dano acumulado Longitudinal entre bloco virtual e provas experimentais

Relação entre Dano Total Acumulado Direção Longitudinal Projeto 1				
	Dianteiro Esquerdo	Dianteiro Direito	Traseiro Esquerdo	Traseiro Direito
<i>PotHole</i>	8.979E-21	5.888E-21	-	-
<i>Pave Belga</i>	3.259E-20	5.003E-20	-	-
Man. Longitudinais	4.485E-19	4.574E-19	-	-
Man. Curvas	2.066E-21	2.068E-21	-	-
Total dano acumulado Virtual	4.921E-19	5.154E-19	-	-
Prova a Banco Longitudinal	2.890E-19	2.890E-19	-	-
Bloco Virtual/Prova a Banco Longitudinal	1.7	1.8	-	-
Relação entre Dano Total Acumulado Direção Longitudinal Projeto 2				
	Dianteiro Esquerdo	Dianteiro Direito	Traseiro Esquerdo	Traseiro Direito
<i>PotHole</i>	6.492E-21	1.934E-20	-	-
<i>Pave Belga</i>	1.736E-20	2.165E-20	-	-
Man. Longitudinais	7.920E-19	8.317E-19	-	-
Man. Curvas	1.074E-21	9.875E-22	-	-
Total dano acumulado Virtual	8.169E-19	8.737E-19	-	-
Prova a Banco Longitudinal	4.849E-19	4.849E-19	-	-
Bloco Virtual/Prova a Banco Longitudinal	1.7	1.8	-	-
Relação entre Dano Total Acumulado Direção Longitudinal Projeto 3				
	Dianteiro Esquerdo	Dianteiro Direito	Traseiro Esquerdo	Traseiro Direito
<i>PotHole</i>	7.428E-21	8.337E-21	-	-
<i>Pave Belga</i>	2.476E-20	2.900E-20	-	-
Man. Longitudinais	1.058E-18	8.850E-19	-	-
Man. Curvas	3.700E-23	2.826E-23	-	-
Total dano acumulado Virtual	1.090E-18	9.223E-19	-	-
Prova a Banco Longitudinal	9.224E-19	9.224E-19	-	-
Bloco Virtual/Prova a Banco Longitudinal	1.2	1.0	-	-
Relação entre Dano Total Acumulado Direção Longitudinal Projeto 4				
	Dianteiro Esquerdo	Dianteiro Direito	Traseiro Esquerdo	Traseiro Direito
<i>PotHole</i>	8.766E-20	5.819E-20	-	-
<i>Pave Belga</i>	1.972E-19	2.393E-19	-	-
Man. Longitudinais	7.425E-18	7.533E-18	-	-
Man. Curvas	2.455E-20	1.653E-20	-	-
Total dano acumulado Virtual	7.734E-18	7.846E-18	-	-
Prova a Banco Longitudinal	5.127E-18	5.127E-18	-	-
Bloco Virtual/Prova a Banco Longitudinal	1.5	1.5	-	-

TABELA 4.6
Severidade do dano acumulado Lateral entre bloco virtual e provas experimentais

Relação entre Dano Total Acumulado Direção Lateral Projeto 1				
	Dianteiro Esquerdo	Dianteiro Direito	Traseiro Esquerdo	Traseiro Direito
<i>PotHole</i>	1.688E-22	1.595E-22	3.140E-22	4.609E-22
<i>Pave Belga</i>	6.996E-21	1.726E-20	8.238E-22	4.963E-22
Man. Longitudinais	1.837E-21	1.845E-21	2.270E-25	2.315E-25
Man. Curvas	2.063E-18	2.104E-18	8.842E-19	8.861E-19
Total dano acumulado Virtual	2.072E-18	2.123E-18	8.853E-19	8.870E-19
Prova a Banco Lateral	1.074E-18	1.074E-18	7.527E-19	7.527E-19
Bloco Virtual/Prova a Banco Lateral	1.9	2.0	1.2	1.2
Relação entre Dano Total Acumulado Direção Lateral Projeto 2				
	Dianteiro Esquerdo	Dianteiro Direito	Traseiro Esquerdo	Traseiro Direito
<i>PotHole</i>	2.053E-23	5.692E-23	1.005E-23	1.198E-23
<i>Pave Belga</i>	4.839E-22	3.065E-22	9.862E-22	3.309E-22
Man. Longitudinais	1.419E-24	5.574E-25	3.424E-27	6.670E-29
Man. Curvas	2.857E-18	3.032E-18	1.581E-18	1.665E-18
Total dano acumulado Virtual	2.858E-18	3.033E-18	1.582E-18	1.665E-18
Prova a Banco Lateral	2.202E-18	2.202E-18	8.918E-19	8.918E-19
Bloco Virtual/Prova a Banco Lateral	1.3	1.4	1.8	1.9
Relação entre Dano Total Acumulado Direção Lateral Projeto 3				
	Dianteiro Esquerdo	Dianteiro Direito	Traseiro Esquerdo	Traseiro Direito
<i>PotHole</i>	5.068E-23	5.365E-23	1.247E-22	5.223E-23
<i>Pave Belga</i>	8.998E-22	8.715E-22	3.944E-21	2.911E-21
Man. Longitudinais	4.308E-22	3.736E-22	1.389E-27	1.561E-27
Man. Curvas	3.692E-18	3.854E-18	1.173E-17	1.320E-17
Total dano acumulado Virtual	3.693E-18	3.855E-18	1.174E-17	1.320E-17
Prova a Banco Lateral	2.125E-18	2.125E-18	9.486E-18	9.486E-18
Bloco Virtual/Prova a Banco Lateral	1.7	1.8	1.2	1.4
Relação entre Dano Total Acumulado Direção Lateral Projeto 4				
	Dianteiro Esquerdo	Dianteiro Direito	Traseiro Esquerdo	Traseiro Direito
<i>PotHole</i>	2.161E-22	9.358E-22	4.084E-21	4.045E-21
<i>Pave Belga</i>	8.477E-22	7.301E-22	1.417E-20	1.615E-20
Man. Longitudinais	1.642E-22	1.624E-22	9.347E-23	9.294E-23
Man. Curvas	1.528E-17	1.222E-17	1.051E-16	8.988E-17
Total dano acumulado Virtual	1.528E-17	1.222E-17	1.052E-16	8.990E-17
Prova a Banco Lateral	9.763E-18	9.763E-18	8.990E-17	8.990E-17
Bloco Virtual/Prova a Banco Lateral	1.6	1.3	1.2	1.0

Pelas tabelas 4.4, 4.5 e 4.6, verifica-se que os projetos 3 e 4, que correspondem aos veículos comerciais *pick-up* e de passeio também *pick-up*, possuem, com os valores de

repetições utilizados, as maiores relações de danos verticais. Como mostra a tabela 4.4, o bloco virtual chega a ser 2.9 vezes maior que o experimental (roda traseira esquerda do projeto 4) e no mínimo 2.0 vezes considerando os projetos 3 e 4. Isso pode ser explicado pelo número de repetições do *Pave Belga* ter sido normalizado pelo projeto 2 o qual possui um peso inferior (intimamente ligado ao dano vertical) aos projetos 3 e 4. Já para a fadiga longitudinal e lateral, como foram baseadas em provas a banco as quais possuem objetivos específicos, as relações entre os danos não obtiveram tanta discrepância como os danos verticais. Conforme a tabela 4.5 é possível observar que para a direção longitudinal, o bloco virtual chega a ser 1.8 vezes mais severo que o experimental (roda dianteira direita projeto 1 e 2) e isodano conforme a roda dianteira direita do projeto 3. Já para a fadiga lateral, conforme a tabela 4.6, o bloco virtual é no máximo 2.0 vezes o bloco experimental (roda dianteira direita do projeto 1) e isodano na roda traseira direita do projeto 4.

Tal discrepância nos danos verticais, desta forma, necessita ser ajustadas para patamares considerados aceitáveis, já que o dimensionamento, por exemplo, de 2.9 vezes acima que o necessário conforme mostrado, certamente impactaria em aumento de custos e peso do componente ou sistema.

Para o ajuste final do número de repetições, adotou-se um critério citado em **ASTM** (1962) e também prática de avaliação do dano acumulado da FCA, conforme curva de fadiga utilizada no presente trabalho. O critério é empírico e dependente da curva de fadiga utilizada, e define como aceitável se o dano acumulado estiver entre 0.5 e 2.0 do dano de referência. Na falta de referências bibliográficas mais robustas, recentes e específicas para a área automotiva, ainda sim, principalmente por ser prática da FCA, foi o critério utilizado no presente trabalho.

Desta forma, os números de repetições encontrados inicialmente foram ajustados de forma a se obter a relação de danos acumulados mais próximos a 1 e respeitando o critério acima abordado. As tabelas 4.7, 4.8 e 4.9 mostram os resultados encontrados quando se aplicaram as seguintes repetições:

- 70 x o sinal do *PotHole*;
- 150 x o sinal do *Pave Belga*;

- 50000 x Manobras Longitudinais;
- 110000 x Manobras de Curvas.

TABELA 4.7

Severidade do dano acumulado Vertical entre bloco virtual e provas experimentais com as novas repetições

Relação entre Dano Total Acumulado Direção Vertical Projeto 1				
	Dianteiro Esquerdo	Dianteiro Direito	Traseiro Esquerdo	Traseiro Direito
<i>PotHole</i>	2.125E-20	1.790E-20	1.473E-20	1.222E-20
Pave Belga	8.177E-20	8.529E-20	5.558E-20	3.802E-20
Man. Longitudinais	2.004E-22	2.039E-22	2.556E-22	2.612E-22
Man. Curvas	4.976E-20	4.951E-20	4.305E-20	4.318E-20
Total dano acumulado Virtual	1.530E-19	1.529E-19	1.136E-19	9.368E-20
Total LDS (Direção Vertical)	1.739E-19	1.449E-19	1.253E-19	6.739E-20
Bloco Virtual/LDS	0.9	1.1	0.9	1.4
Relação entre Dano Total Acumulado Direção Vertical Projeto 2				
	Dianteiro Esquerdo	Dianteiro Direito	Traseiro Esquerdo	Traseiro Direito
<i>PotHole</i>	2.740E-20	2.322E-20	1.927E-20	2.232E-20
Pave Belga	1.321E-19	1.577E-19	5.721E-20	8.804E-20
Man. Longitudinais	2.816E-22	2.886E-22	4.241E-22	4.690E-22
Man. Curvas	4.100E-20	4.014E-20	8.483E-20	8.311E-20
Total dano acumulado Virtual	2.008E-19	2.213E-19	1.617E-19	1.939E-19
Total LDS (Direção Vertical)	2.942E-19	2.474E-19	1.166E-19	1.741E-19
Bloco Virtual/LDS	0.7	0.9	1.4	1.1

Relação entre Dano Total Acumulado Direção Vertical Projeto 3				
	Dianteiro Esquerdo	Dianteiro Direito	Traseiro Esquerdo	Traseiro Direito
<i>PotHole</i>	6.470E-20	6.061E-20	2.794E-19	2.484E-19
Pave Belga	1.031E-19	8.633E-20	5.047E-19	4.937E-19
Man. Longitudinais	2.776E-22	2.818E-22	1.301E-21	1.404E-21
Man. Curvas	1.490E-19	1.406E-19	3.244E-19	3.211E-19
Total dano acumulado Virtual	3.171E-19	2.879E-19	1.110E-18	1.065E-18
Total LDS (Direção Vertical)	1.878E-19	1.497E-19	8.732E-19	7.175E-19
Bloco Virtual/LDS	1.7	1.9	1.3	1.5

Relação entre Dano Total Acumulado Direção Vertical Projeto 4				
	Dianteiro Esquerdo	Dianteiro Direito	Traseiro Esquerdo	Traseiro Direito
<i>PotHole</i>	1.998E-19	1.839E-19	1.546E-18	1.557E-18
Pave Belga	3.089E-19	2.797E-19	1.385E-18	1.516E-18
Man. Longitudinais	3.703E-21	3.727E-21	7.161E-21	7.229E-21
Man. Curvas	1.865E-19	1.852E-19	1.610E-18	1.820E-18
Total dano acumulado Virtual	6.988E-19	6.525E-19	4.548E-18	4.901E-18
Total LDS (Direção Vertical)	4.792E-19	4.136E-19	2.234E-18	2.491E-18
Bloco Virtual/LDS	1.5	1.6	2.0	2.0

TABELA 4.8

Severidade do dano acumulado Longitudinal entre bloco virtual e provas experimentais com as novas repetições

Relação entre Dano Total Acumulado Direção Longitudinal Projeto 1				
	Dianteiro Esquerdo	Dianteiro Direito	Traseiro Esquerdo	Traseiro Direito
<i>PotHole</i>	8.979E-21	5.888E-21	-	-
Pave Belga	1.614E-20	2.477E-20	-	-
Man. Longitudinais	3.340E-19	3.407E-19	-	-
Man. Curvas	1.598E-21	1.600E-21	-	-
Total dano acumulado Virtual	3.607E-19	3.729E-19	-	-
Prova a Banco Longitudinal	2.890E-19	2.890E-19	-	-
Bloco Virtual/Prova a Banco Longitudinal	1.2	1.3	-	-

Relação entre Dano Total Acumulado Direção Longitudinal Projeto 2				
	Dianteiro Esquerdo	Dianteiro Direito	Traseiro Esquerdo	Traseiro Direito
<i>PotHole</i>	6.492E-21	1.934E-20	-	-
Pave Belga	8.596E-21	1.072E-20	-	-
Man. Longitudinais	5.898E-19	6.194E-19	-	-
Man. Curvas	8.312E-22	7.641E-22	-	-
Total dano acumulado Virtual	6.057E-19	6.502E-19	-	-
Prova a Banco Longitudinal	4.849E-19	4.849E-19	-	-
Bloco Virtual/Prova a Banco Longitudinal	1.2	1.3	-	-

Relação entre Dano Total Acumulado Direção Longitudinal Projeto 3				
	Dianteiro Esquerdo	Dianteiro Direito	Traseiro Esquerdo	Traseiro Direito
<i>PotHole</i>	7.428E-21	8.337E-21	-	-
Pave Belga	1.226E-20	1.436E-20	-	-
Man. Longitudinais	7.878E-19	6.591E-19	-	-
Man. Curvas	2.863E-23	2.187E-23	-	-
Total dano acumulado Virtual	8.075E-19	6.818E-19	-	-
Prova a Banco Longitudinal	9.224E-19	9.224E-19	-	-
Bloco Virtual/Prova a Banco Longitudinal	0.9	0.7	-	-

Relação entre Dano Total Acumulado Direção Longitudinal Projeto 4				
	Dianteiro Esquerdo	Dianteiro Direito	Traseiro Esquerdo	Traseiro Direito
<i>PotHole</i>	8.766E-20	5.819E-20	-	-
Pave Belga	9.764E-20	1.184E-19	-	-
Man. Longitudinais	5.530E-18	5.610E-18	-	-
Man. Curvas	1.900E-20	1.279E-20	-	-
Total dano acumulado Virtual	5.734E-18	5.799E-18	-	-
Prova a Banco Longitudinal	5.127E-18	5.127E-18	-	-
Bloco Virtual/Prova a Banco Longitudinal	1.1	1.1	-	-

TABELA 4.9
Severidade do dano acumulado Lateral entre bloco virtual e provas experimentais com as novas repetições

Relação entre Dano Total Acumulado Direção Lateral Projeto 1				
	Dianteiro Esquerdo	Dianteiro Direito	Traseiro Esquerdo	Traseiro Direito
<i>PotHole</i>	1.688E-22	1.595E-22	3.140E-22	4.609E-22
Pave Belga	3.463E-21	8.544E-21	4.078E-22	2.457E-22
Man. Longitudinais	1.368E-21	1.374E-21	1.691E-25	1.724E-25
Man. Curvas	1.596E-18	1.628E-18	6.842E-19	6.856E-19
Total dano acumulado Virtual	1.601E-18	1.638E-18	6.849E-19	6.863E-19
Prova a Banco Lateral	1.074E-18	1.074E-18	7.527E-19	7.527E-19
Bloco Virtual/Prova a Banco Lateral	1.5	1.5	0.9	0.9
Relação entre Dano Total Acumulado Direção Lateral Projeto 2				
	Dianteiro Esquerdo	Dianteiro Direito	Traseiro Esquerdo	Traseiro Direito
<i>PotHole</i>	2.053E-23	5.692E-23	1.005E-23	1.198E-23
Pave Belga	2.396E-22	1.517E-22	4.882E-22	1.638E-22
Man. Longitudinais	1.057E-24	4.151E-25	2.550E-27	4.968E-29
Man. Curvas	2.211E-18	2.346E-18	1.224E-18	1.288E-18
Total dano acumulado Virtual	2.211E-18	2.346E-18	1.224E-18	1.288E-18
Prova a Banco Lateral	2.202E-18	2.202E-18	8.918E-19	8.918E-19
Bloco Virtual/Prova a Banco Lateral	1.0	1.1	1.4	1.4
Relação entre Dano Total Acumulado Direção Lateral Projeto 3				
	Dianteiro Esquerdo	Dianteiro Direito	Traseiro Esquerdo	Traseiro Direito
<i>PotHole</i>	5.068E-23	5.365E-23	1.247E-22	5.223E-23
Pave Belga	4.454E-22	4.314E-22	1.953E-21	1.441E-21
Man. Longitudinais	3.208E-22	2.782E-22	1.034E-27	1.162E-27
Man. Curvas	2.857E-18	2.982E-18	9.077E-18	1.021E-17
Total dano acumulado Virtual	2.858E-18	2.983E-18	9.079E-18	1.021E-17
Prova a Banco Lateral	2.125E-18	2.125E-18	9.486E-18	9.486E-18
Bloco Virtual/Prova a Banco Lateral	1.3	1.4	1.0	1.1
Relação entre Dano Total Acumulado Direção Lateral Projeto 4				
	Dianteiro Esquerdo	Dianteiro Direito	Traseiro Esquerdo	Traseiro Direito
<i>PotHole</i>	2.161E-22	9.358E-22	4.084E-21	4.045E-21
Pave Belga	4.197E-22	3.615E-22	7.012E-21	7.993E-21
Man. Longitudinais	1.223E-22	1.209E-22	6.961E-23	6.921E-23
Man. Curvas	1.182E-17	9.455E-18	8.135E-17	6.955E-17
Total dano acumulado Virtual	1.182E-17	9.456E-18	8.136E-17	6.956E-17
Prova a Banco Lateral	9.763E-18	9.763E-18	8.990E-17	8.990E-17
Bloco Virtual/Prova a Banco Lateral	1.2	1.0	0.9	0.8

Com este novo número de repetições dos sinais experimentais, a relação máxima entre os danos verticais, longitudinais e laterais permaneceram de forma satisfatória dentro do intervalo de 0.5 a 2.0 para todos os projetos conforme visto nas tabelas 4.7, 4.8 e 4.9.

A seguir, foi feito o comparativo da influência de cada pista virtual e manobras na composição do bloco final virtual. Conforme se observa pelas tabelas 4.10, 4.11 e 4.12, o dano vertical foi causado principalmente pelo *Pave Belga* (em média 45%), manobras de curva (em média 34%) por terem grande transferência de carga vertical por lado do veículo, e *PotHole* em média 17.2% podendo chegar a 34% no caso do eixo traseiro do projeto 4. Neste último, a grande influência do *PotHole* pode ser explicada pelo tipo de suspensão utilizada, Multi-link, que apesar de grandes vantagens em relação a dirigibilidade do veículo e controle de parâmetros elastocinemáticos em relação a outras tipologias, possui as desvantagens de ter um considerável peso não suspenso e requer grande espaço de instalação. As manobras longitudinais são responsáveis em média por 0.14% do dano vertical do bloco virtual.

Já para o dano acumulado longitudinal, o dano provém quase na totalidade das manobras longitudinais de aceleração e frenagens.

De forma semelhante, o dano acumulado lateral total do bloco virtual é resultante das manobras de curvas.

TABELA 4.10
Influência percentual dos percursos/manobras no dano acumulado virtual vertical

<i>Pave Belga</i>				
	Dianteiro Esquerdo	Dianteiro Direito	Traseiro Esquerdo	Traseiro Direito
Projeto 1	53.45%	55.78%	48.92%	40.58%
Projeto 2	65.79%	71.24%	35.37%	45.39%
Projeto 3	32.51%	29.99%	45.48%	46.37%
Projeto 4	44.20%	42.86%	30.45%	30.93%
<i>Manobras de Curvas</i>				
Projeto 1	32.53%	32.38%	37.89%	46.10%
Projeto 2	20.42%	18.14%	52.45%	42.85%
Projeto 3	47.00%	48.85%	29.23%	30.16%
Projeto 4	26.68%	28.38%	35.40%	37.15%
<i>PotHole</i>				
Projeto 1	13.89%	11.71%	12.96%	13.04%
Projeto 2	13.65%	10.49%	11.92%	11.51%
Projeto 3	20.40%	21.06%	25.18%	23.34%
Projeto 4	28.59%	28.19%	33.99%	31.77%
<i>Manobras Longitudinais</i>				
Projeto 1	0.13%	0.13%	0.22%	0.28%
Projeto 2	0.14%	0.13%	0.26%	0.24%
Projeto 3	0.09%	0.10%	0.12%	0.13%
Projeto 4	0.53%	0.57%	0.16%	0.15%

TABELA 4.11
Influência percentual dos percursos/manobras no dano acumulado virtual longitudinal

<i>Pave Belga</i>				
	Dianteiro Esquerdo	Dianteiro Direito	Traseiro Esquerdo	Traseiro Direito
Projeto 1	4.47%	6.64%	-	-
Projeto 2	1.42%	1.65%	-	-
Projeto 3	1.52%	2.11%	-	-
Projeto 4	1.70%	2.04%	-	-
<i>Manobras de Curvas</i>				
Projeto 1	0.44%	0.43%	-	-
Projeto 2	0.14%	0.12%	-	-
Projeto 3	0.00%	0.00%	-	-
Projeto 4	0.33%	0.22%	-	-
<i>PotHole</i>				
Projeto 1	2.49%	1.58%	-	-
Projeto 2	1.07%	2.97%	-	-
Projeto 3	0.92%	1.22%	-	-
Projeto 4	1.53%	1.00%	-	-
<i>Manobras Longitudinais</i>				
Projeto 1	92.59%	91.35%	-	-
Projeto 2	97.37%	95.26%	-	-
Projeto 3	97.56%	96.67%	-	-
Projeto 4	96.44%	96.73%	-	-

TABELA 4.12
Influência percentual dos percursos/manobras no dano acumulado virtual lateral

<i>Pave Belga</i>				
	Dianteiro Esquerdo	Dianteiro Direito	Traseiro Esquerdo	Traseiro Direito
Projeto 1	0.22%	0.52%	0.06%	0.04%
Projeto 2	0.01%	0.01%	0.04%	0.01%
Projeto 3	0.02%	0.01%	0.02%	0.01%
Projeto 4	0.00%	0.00%	0.01%	0.01%
<i>Manobras de Curvas</i>				
Projeto 1	99.69%	99.38%	99.89%	99.90%
Projeto 2	99.99%	99.99%	99.96%	99.99%
Projeto 3	99.97%	99.97%	99.98%	99.99%
Projeto 4	99.99%	99.99%	99.99%	99.98%
<i>PotHole</i>				
Projeto 1	0.01%	0.01%	0.05%	0.07%
Projeto 2	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
Projeto 3	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
Projeto 4	0.00%	0.01%	0.01%	0.01%
<i>Manobras Longitudinais</i>				
Projeto 1	0.09%	0.08%	0.00%	0.00%
Projeto 2	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
Projeto 3	0.01%	0.01%	0.00%	0.00%
Projeto 4	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%

5. CONCLUSÕES

5.1 Comparativo virtual x provas experimentais das forças resultantes

Diante das particularidades dos percursos do LDS, foram escolhidos dois tipos de pistas virtuais digitalizadas na tentativa de representar as irregularidades e obstáculos que proporcionam consideráveis magnitudes de forças, principalmente, verticais nos centros das rodas. O *PotHole* virtual, como mostrado nos *level crossings* apresentados, foi responsável por proporcionar as maiores magnitudes de cargas verticais de forma a cobrir as magnitudes encontradas nos sinais do LDS, enquanto que o *Pave Belga* virtual foi o escolhido por ser a representação do percurso de calçamento de pedra encontrado no campo de provas de Balocco, desta forma aproximando-se dos calçamentos de pedra que fazem parte do LDS. Conforme apresentado nos comparativos das histórias temporais virtuais e LDS dos centros das rodas, apesar do pico de carga no *PotHole* ser consideravelmente maior do que o pico encontrado no LDS, como o caso do projeto 2 em que a diferença foi de 47%, considerou-se tais picos satisfatórios, visto que na prática, entre passagens no mesmo percurso com o mesmo veículo, ocorrerem consideráveis diferenças de picos de cargas, conforme apresentado no Anexo A.

As forças para a execução das prova de fadiga a Banco Longitudinal são baseadas em cálculos analíticos que consideram somente manobras de aceleração e frenagens do eixo motriz durante toda a vida útil do veículo. Desta forma, a manobra de aceleração da gravidade longitudinal em ambos os sentidos, positivo e negativo no centro de massa do modelo, foi adotado no modelo vRLDA para a representação da prova a banco. As magnitudes de cargas provenientes das manobras longitudinais apresentaram-se próximas às previstas para as provas a banco. A diferença máxima entre uma manobra longitudinal e a força da prova a banco foi de 20% no caso do projeto 2 na roda direita. Ressalta-se ainda que o *PotHole* e *Pave Belga* foram novamente responsáveis pelas maiores magnitudes de cargas longitudinais, sendo que o *PotHole* em alguns casos resultou em uma carga de até 100% maior do que a prevista na prova a banco.

De forma semelhante à prova de fadiga longitudinal, as forças das provas de fadiga laterais são calculadas baseadas em manobras de curvas extremas geram cargas laterais, ou ainda no eixo y, bastante consideráveis quando se analisa as rodas externas a curva. Para a representação da prova experimental, adotou-se então a manobra virtual de aplicação de aceleração da gravidade nos centros de massas dos modelos vRLDA's até o limite de capotamento observado no modelo. Com exceção das cargas laterais (lado externo a curva) do eixo traseiro do projeto 3, todos os outros modelos obtiveram cargas laterais ligeiramente superiores em relação as forças previstas nas provas a banco. A maior diferença encontrada foi de 15% para a roda dianteira esquerda no projeto 1. Quando se analisa a roda interna a curva, nos modelos virtuais, os outros percursos como o *Pave Belga* superam em alguns ciclos a magnitude da manobra de curva. Isso pode ser explicado pelo fato de que pelo cinematismo do curso das suspensões, as rodas não ficam perfeitamente paralelas (ângulos de câmber e convergência), além da assimetria dos percursos, desta forma os impactos provocados pelo *Pave Belga* acarretaram forças laterais. Desta forma a manobra de aplicação da aceleração da gravidade lateral nos modelos foi considerada satisfatória, da mesma forma que a longitudinal.

Portanto, considera-se as escolhas do *PotHole* e *Pave Belga*, manobras estáticas de acelerações laterais e longitudinais suficientes para a representação das provas experimentais de fadiga.

5.2 Elaboração das repetições em cada percurso e manobra virtual baseados nos danos acumulados e ajuste final do bloco

Após os comparativos de forças feitos nos centros das rodas, elaborou-se o número de repetições de forma que o dano acumulado virtual fosse equivalente ao dano acumulado na prova experimental. Para a composição do dano acumulado vertical, utilizou-se majoritariamente o *PotHole* e *Pave Belga*, e tomou-se como base o LDS. Os projetos 1 e 2 obtiveram os maiores números de repetições necessários, isso demonstra que o peso do veículo tem influência predominante na composição do dano vertical, já que o veículo mais pesado, projeto 4 eixo traseiro, obteve o menor número de repetições necessárias no objetivo do LDS. Após a determinação das repetições do *PotHole* e *Pave*

Belga, determinaram-se os números de repetições das manobras longitudinais e laterais nesta ordem. No primeiro momento, com o cálculo da severidade do dano acumulado virtual em relação ao experimental, chegou-se ao fator máximo de 2.8 vezes no caso dos projetos 3 e 4. De fato, para o ajuste final do número de repetições, adotou-se um critério padrão da FCA para equivalência do dano acumulado, sendo que em todos os casos, com o número de repetições ajustado, o dano acumulado previsto respeitou o intervalo aceitável.

Por fim, no bloco virtual final de fadiga proposto, foi verificada a influência percentual de cada percurso e manobra na composição total do bloco. O dano acumulado vertical foi causado majoritariamente pelo *Pave Belga* em média de 45% conforme tabela 4.10. Para a direção longitudinal, o dano acumulado, com média de 97%, foi resultado das manobras de aceleração no centro de massa longitudinais. E por fim, para o dano acumulado lateral, as manobras de curvas foram responsáveis por 99% em média.

Com tais resultados, considera-se o bloco virtual final proposto apto ao dimensionamento a fadiga tanto para componentes de chassis e carrocerias de forma unificada.

5.3 Trabalhos futuros

- Aplicação do bloco proposto da presente dissertação, em ambiente virtual, em um componente de chassis e outro de carroceria já dimensionado pelos métodos antigos. E posterior comparação dos resultados de tensão, vida a fadiga e forma geométrica dos componentes.
- Validação do bloco virtual proposto com as provas experimentais de fadiga.
- Comparação, depois de validado, do bloco virtual proposto com os aplicados nos mercados EMEA e NAFTA.

ABSTRACT

This work aims to propose a virtual fatigue block, which consists of virtual tracks and maneuvers and their respective repetitions, standardized, for designing chassis components and bodies in the virtual phases. Using four projects already consolidated, their respective vRLDA (Finite Element based) models were built to provide loads in time histories. In addition, virtual tracks and maneuvers were used which best represent the experimental bench fatigue tests and the LDS which assess the durability of chassis and bodies respectively. From the Level Crossings graphs resulting from the virtual time histories, the resulting wheel center loads in the three main directions of the vehicle from the virtual tracks and static maneuvers with the loads predicted in the experimental tests were compared. After validating the virtual models' way of passing, regarding speed and pathways, a number of repetitions for these pathways and virtual static maneuvers were elaborated so that the virtual accumulated damage was considered equivalent to those predicted in the experimental tests according to the adopted criterion. Comparison results of virtual vertical and longitudinal load magnitudes when compared with LDS results and longitudinal bench tests show considerable discrepancies due to *PotHole*. However, such discrepancies were considered acceptable, mainly because LDS also results in noticeably shifting loads (as discussed in Annex A). For lateral loads, there were no differences like the other two previous directions. Finally, calculated the number of repetitions for each static maneuver and virtual track, with the equivalent damage criterion adopted, the accumulated of the virtual fatigue schedule proposed respected the criterion intervals after being properly adjusted and thus considered viable for virtual durability vehicle evaluation.

Keywords: *Fatigue, Cumulative Damage, Finite Element Analysis, Durability, Chassis, Bodies.*

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ALMACINHA, J., A.,S. "Análise dinâmica de estruturas de veículos." 1985.
2. ANTHES, R. J. Modified rainflow counting keeping the load sequence. International Journal Fatigue, Great Britain, Vol. 19, No 7, p.525-529, 1997.
3. APOSTILA CENTRO RICERCHE FIAT, 2009.
4. ASTM, Symposium on Fatigue Tests of Aircraft Structures: Low-Cycle, Full-scale, and Helicopters, ASTM Special Technical Publication No 338. Los Angeles Calif. 1962.
5. BAKKER, E., HANS B. PACEJKA, LARS L.: A new tire model with an application in vehicle dynamics studies. No. 890087. SAE Technical Paper, 1989.
6. BATHE, K. J.,.: Finite Element Procedures in Engineering Analysis, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey 07632, 1982.
7. CARVALHO, G., D., C.: Metodologia para avaliação do comportamento dinâmico de passageiro em veículo automotor usando modelagem numérica. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Belo Horizonte. 180f. 2009.
8. CHINDAMO, D., GADOLA, M., MARCHESIN, FELIPE P.: Reproduction of real-world road profiles on a *Four-Poster* rig for indoor vehicle chassis and suspension durability testing. Advances in Mechanical Engineering, v. 9, n. 8, p. 1687814017726004, 2017.
9. COLLINS, J. A.: Failure of Materials in Mechanical Design. 2.ed. New York: John Wiley & Sons, 1993. 643p.
10. COOK, R. D., MALKUS, D. S., PLESHA, M. E., WITT, R. J.: Concepts and applications of finite element analysis. John Wiley & Sons. 4ª Ed. Wisconsin, 2002.

11. DOS ANJOS M. T. B., MEDEIROS D.: Topological Optimization of an Engine Bracket. In: 24th ABCM International Congress of Mechanical Engineering, 2017, Curitiba. Proceedings of the 24th ABCM International Congress of Mechanical Engineering, 2017.
12. DUNI E., TONIATO G., SAPONARO R., PULEO V., SMERIGLIO P.: Vehicle Dynamic Solution Based on Finite Element Tire/Road Interaction Implemented through Implicit/Explicit Sequential and Co-Simulation Approach, SAE 2010 World Congress, Detroit, 2010
13. DUNI E., TONIATO G., SAPONARO R., SMERIGLIO P.: Vehicle Fatigue Load Prediction based on Finite Element TIRE/ROAD Interaction implemented in an Integrated Implicit Explicit Approach, *Abaqus* Users' Conference, May, New Port, 2008.
14. DUNI, E., et al. "Numerical simulation of full vehicle dynamic behaviour based on the interaction between ABAQUS/Standard and explicit codes." *Abaqus* Users' Conference, June Munich. 2003.
15. DURABILITY - LATAM - LATERAL LOADS STRATEGY__GLOBAL_DURY_MTG_OCT_24_16. Apostila FCA, 2016.
16. ELS, P. S.; THERON, N.J.; UYS, P.E.; THORESSON, M.J. The ride comfort vs. handling compromise for off-road vehicles, *Journal of Terramechanics*, v. 44, p. 303-317, 2007.
17. FALANCS THEORY, Apostila manual de cálculo de fadiga do *Tecware*, 2012.
18. FATEMI, A. Cumulative fatigue damage and life prediction theories: a survey of state of the art for homogeneous materials. *International Journal Fatigue*, Great Britain, Vol. 20, No 1, p.9-34, 1998.
19. GILLESPIE, T., D.: *Fundamentals of vehicle dynamics*. Warrendale: Society of Automotive Engineers, p 495, 1992.
20. LEAL, V.: Estudo cinemático de suspensões veiculares do tipo eixo de torção. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Pontifícia Universidade Católica de

Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Belo Horizonte. 174f. 2007.

21. LEE, Y. L., PAN, J., HATHAWAY, R., & BARKEY, M. Fatigue testing and analysis: theory and practice (Vol. 13). Butterworth-Heinemann, 2005.
22. LEE, Y., LU, M., SEGAR, R. C., WELCH, C. D., AND RUDY, R. J.: Reliability-based cumulative fatigue damage assessment in crack initiation, International Journal of Materials and Product Technology, Vol. 14, No. 1, pp. 1–16. 1999.
23. MA, R.: Development of a Terrain Pre-filtering Technique applicable to Probabilistic Terrain using Constraint Mode Tire Model. Virginia Tech, 2013.
24. MO, K., SUH, K., HONG, S.: New approach in vehicle durability evaluation, virtual proving ground. In: Proc. of 28th, FISITA World Congress, Seoul: KSAE, paper. 2000.
25. M. BLUNDELL E D., HARTY B., Michael & H., D.: Multibody Systems Approach to Vehicle Dynamics. 1 ed. Elsevier Butterworth-Heinemann, 2004, 518 p.
26. Norma FCA LP.7T015, 2017.
27. Norma FCA 7-F5210, 2017.
28. Norma FCA 7-F1510, 2017.
29. Norma FCA 7-F5240, 2004.
30. Norma FCA 7-N4130, 2004.
31. Norma FCA 07691, 2008.
32. PALMA, E. S.; VIDAL, F. A. C. Fatigue damage analysis on body shell of a passenger vehicle. Journal of materials engineering and performance, v. 11, n. 4, p. 450-460, 2002.
33. Philips, E. P., “Periodic overload and transport spectrum fatigue crack growth test of Ti62222STA and Al2024T3 sheet” NASA TM 1999-208995, (1999).

34. SANTOS, E., S.: Correlação de danos de fadiga de uma barra estabilizadora em provas de laboratório e de estrada.. 88f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Belo Horizonte, 1999.
35. SCHRANK, M.: Simulation as a Key Enabler to Address Challenges in the Automotive Industry.
36. SURENDRANATH, H., OANCEA, V., SUBBARAYALU, S.: Full vehicle durability prediction using Co-Simulation between Implicit and Explicit finite element solvers. Tech. rep., Dassault Systèmes Simulia Corp. 2011.
37. WIRSHING, P. H., PAEZ, T. L., ORTIZ, H., Random Vibration: Theory and Practice, Wiley, New York, 1995.
38. <https://www.esss.co/blog/engenharia-assistida-por-computador-o-que-e-e-como-funciona/>. Acessado em 15 de julho de 2019.
39. <https://www.blogiveco.com.br/voce-sabe-diferenca-entre-chassi-e-monobloco/>. Acessado em 20 de junho de 2019.

ANEXO A

A.1 – Level Crossings sinais LDS das cargas verticais resultantes do Calçamento e Terra.

Nesta seção são apresentados os resultados de *Level Crossing* das cargas verticais dos quatro projetos em estudo, descritos na tabela 3.2, resultantes das passagens nos percursos que compõem o LDS, conforme tabelas 3.3 a 3.6, e a diferença percentual do maior pico de carga encontrado em cada sinal em relação ao menor. Serão apresentados somente os sinais provindos do calçamento de pedra e percurso de terra, pois estes possuem consideráveis discrepâncias em alguns casos. Estes comparativos visam justificar a aceitação das diferenças encontradas entre picos de cargas dos sinais virtuais do *PotHole* em relação ao LDS, para a composição do bloco de fadiga virtual.

A seguir, nos gráficos A1, A2, A3, A4, A5 e A6 são apresentados os *Level Crossings* das passagens feitas nos percursos de Terra e Calçamento do LDS, dos eixos dianteiro e traseiro, para o projeto 1, na situação do carro vazio e carregado.

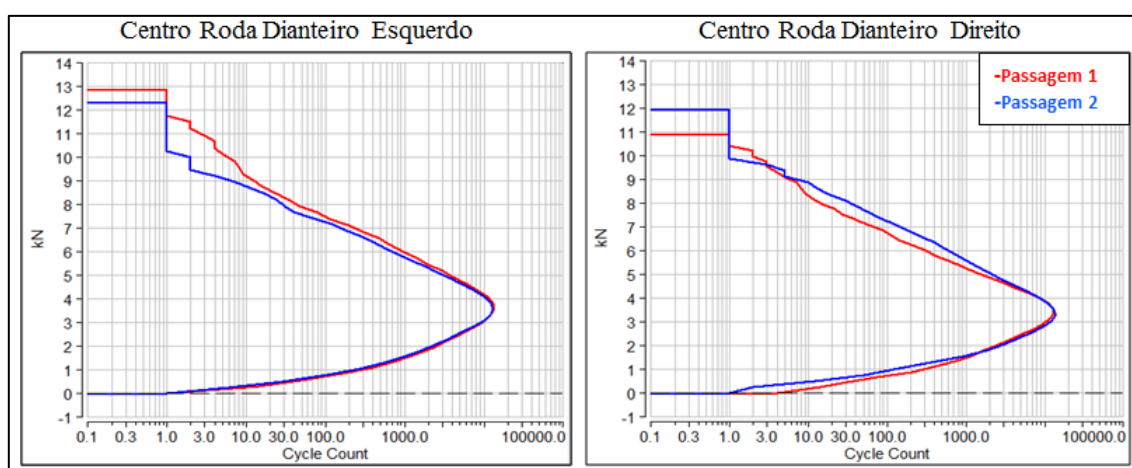


GRÁFICO A1 – Resultados Level Crossing eixo dianteiro Projeto 1 no percurso de Terra carro carregado – 2 passagens feitas.

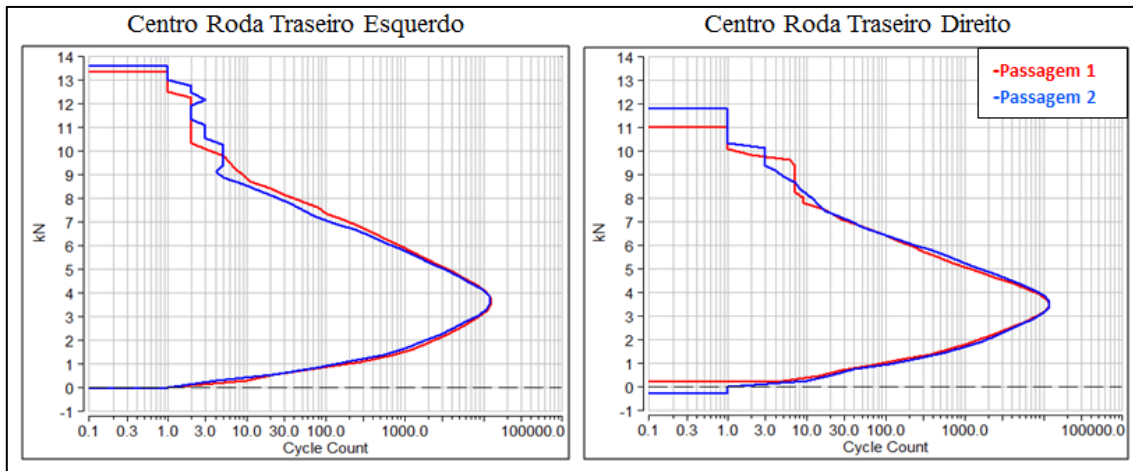


GRÁFICO A2 – Resultados Level Crossing eixo traseiro Projeto 1 no percurso de Terra carro carregado – 2 passagens feitas.

Cabe ressaltar que o percurso de Terra para o projeto 1 só havia 1 sinal disponível. Consequentemente não há comparativo entre os picos máximos encontrados nos sinais.

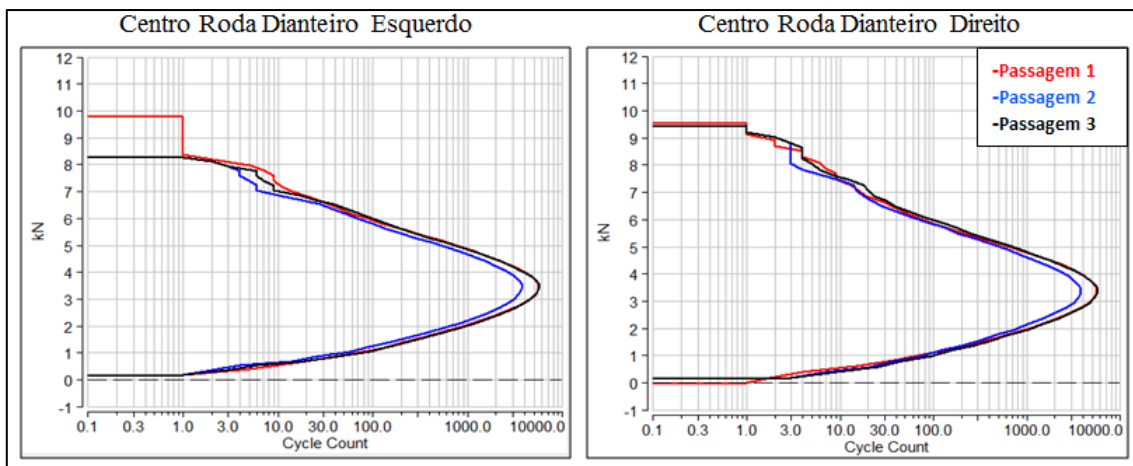


GRÁFICO A3 – Resultados Level Crossing eixo dianteiro Projeto 1 no percurso de Calçamento carro carregado – 3 passagens feitas.

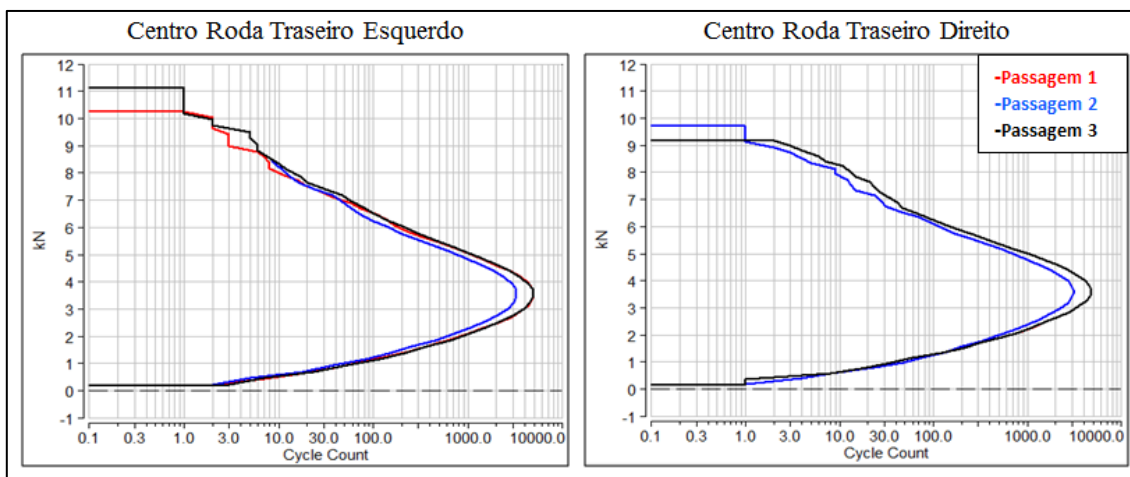


GRÁFICO A4 – Resultados Level Crossing eixo traseiro Projeto 1 no percurso de Calçamento carro carregado – 3 passagens feitas.

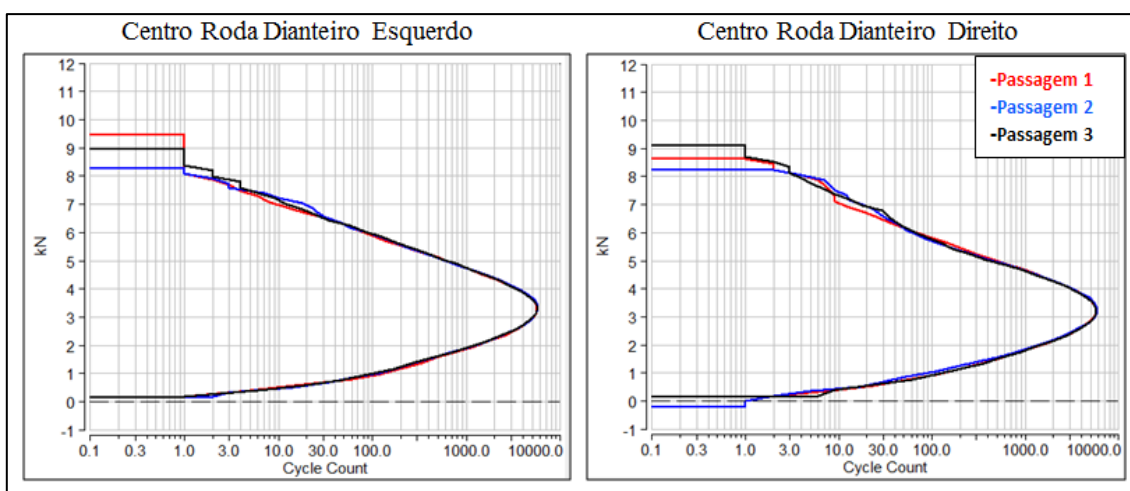


GRÁFICO A5 – Resultados Level Crossing eixo dianteiro Projeto 1 no percurso de Calçamento carro vazio – 3 passagens feitas.

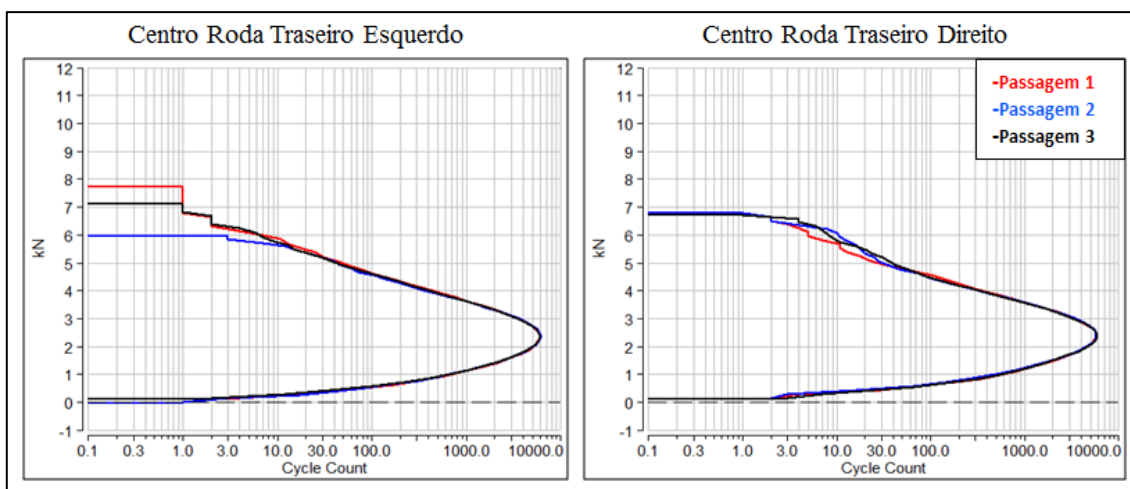


GRÁFICO A6 – Resultados Level Crossing eixo traseiro Projeto 1 no percurso de Calçamento carro vazio – 3 passagens feitas.

A Tabela A.1 apresenta os comparativos percentuais, entre o maior e o menor pico de carga encontrado para as diferentes passagens nos percursos dos gráficos A1 a A6:

TABELA A1
Diferenças percentuais entre maiores e menores picos de cargas no projeto 1 no LDS

Projeto 1							
Carro Carregado				Carro Vazio			
Terra				Terra			
Roda Dianteira Direita	Roda Dianteira Esquerda	Roda Traseira Direita	Roda Traseira Esquerda	Roda Dianteira Direita	Roda Dianteira Esquerda	Roda Traseira Direita	Roda Traseira Esquerda
6.8%	14.4%	1.8%	5.0%	-	-	-	
Calçamento				Calçamento			
Roda Dianteira Direita	Roda Dianteira Esquerda	Roda Traseira Direita	Roda Traseira Esquerda	Roda Dianteira Direita	Roda Dianteira Esquerda	Roda Traseira Direita	Roda Traseira Esquerda
13.0%	5.0%	10.0%	3.0%	14.5%	10.8%	29.5%	2.0

A seguir, nos gráficos A7, A8, A9, A10, A11, A12, A13 e A14 são apresentados os *Level Crossings* das passagens feitas nos percursos de Terra e Calçamento do LDS, dos eixos dianteiro e traseiro, para o projeto 2, na situação do carro vazio e carregado.

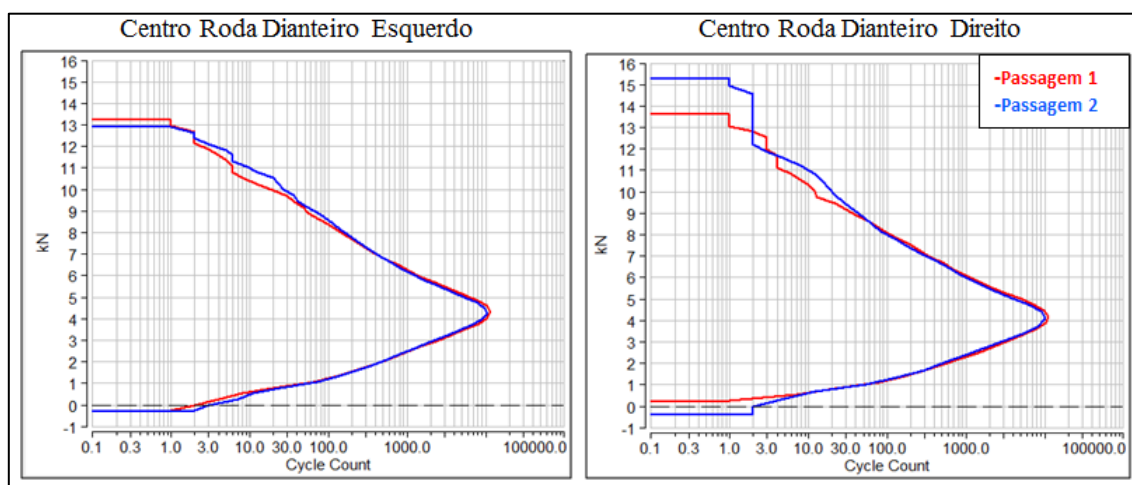


GRÁFICO A7 – Resultados Level Crossing eixo dianteiro Projeto 2 no percurso de Terra carro carregado – 2 passagens feitas.

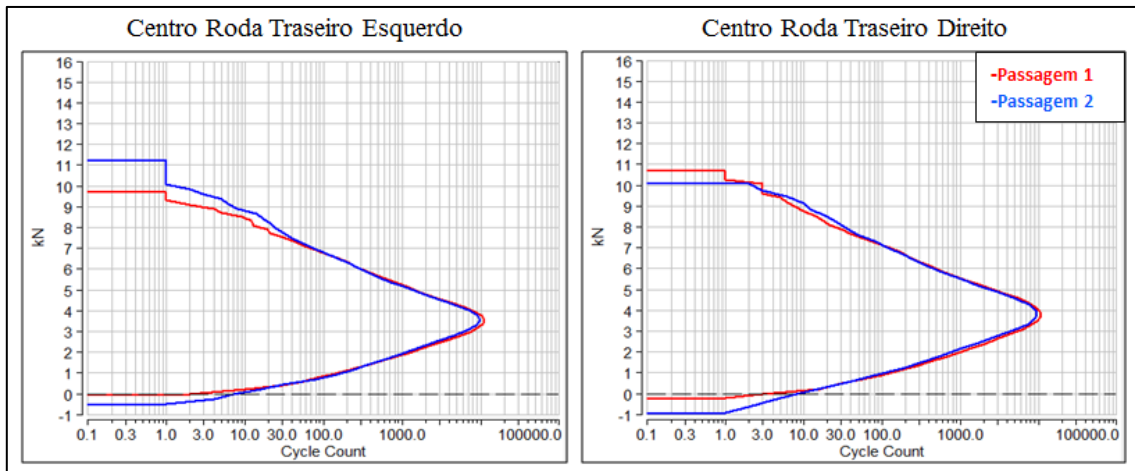


GRÁFICO A8 – Resultados Level Crossing eixo traseiro Projeto 2 no percurso de Terra carro carregado – 2 passagens feitas.

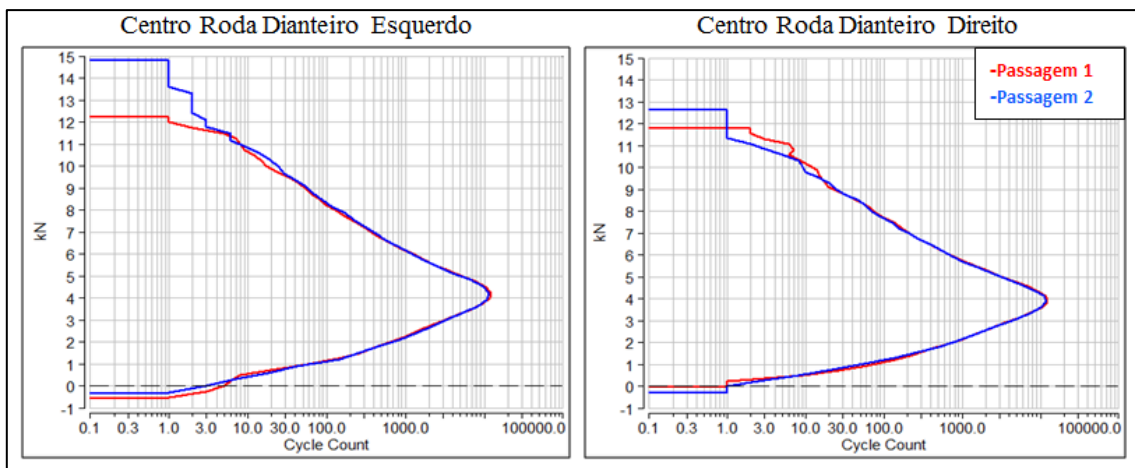


GRÁFICO A9 – Resultados Level Crossing eixo dianteiro Projeto 2 no percurso de Terra carro vazio – 2 passagens feitas.

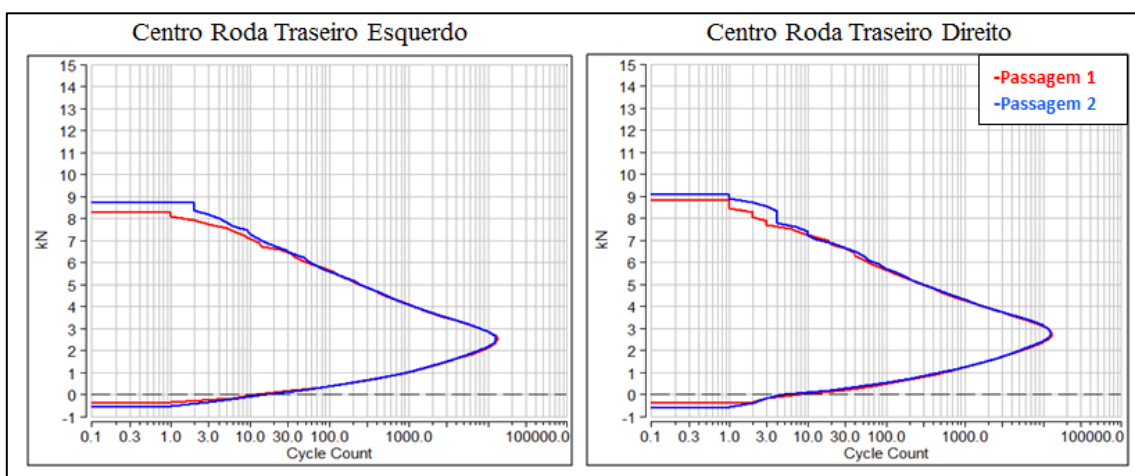


GRÁFICO A10 – Resultados Level Crossing eixo traseiro Projeto 2 no percurso de Terra carro vazio – 2 passagens feitas.

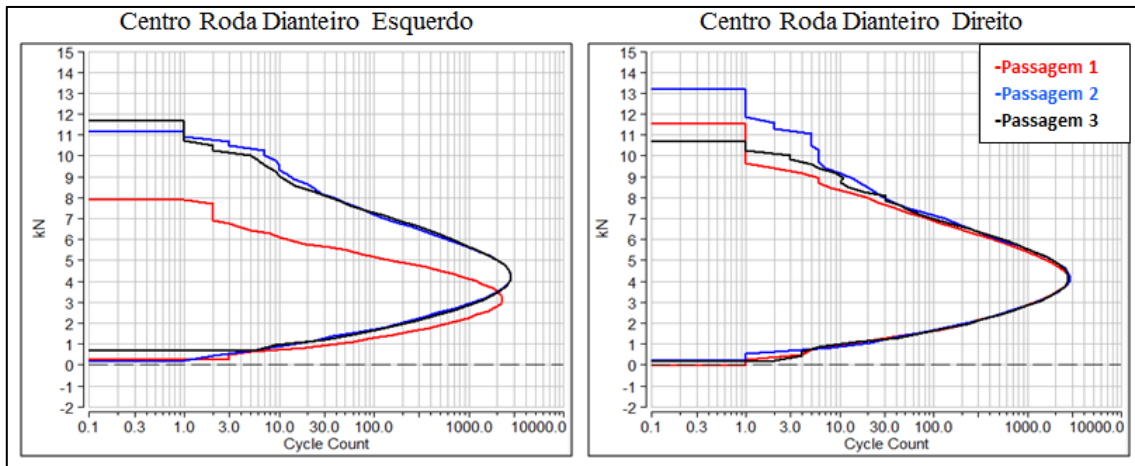


GRÁFICO A11 – Resultados Level Crossing eixo dianteiro Projeto 2 no percurso de Calçamento carro carregado – 3 passagens feitas.

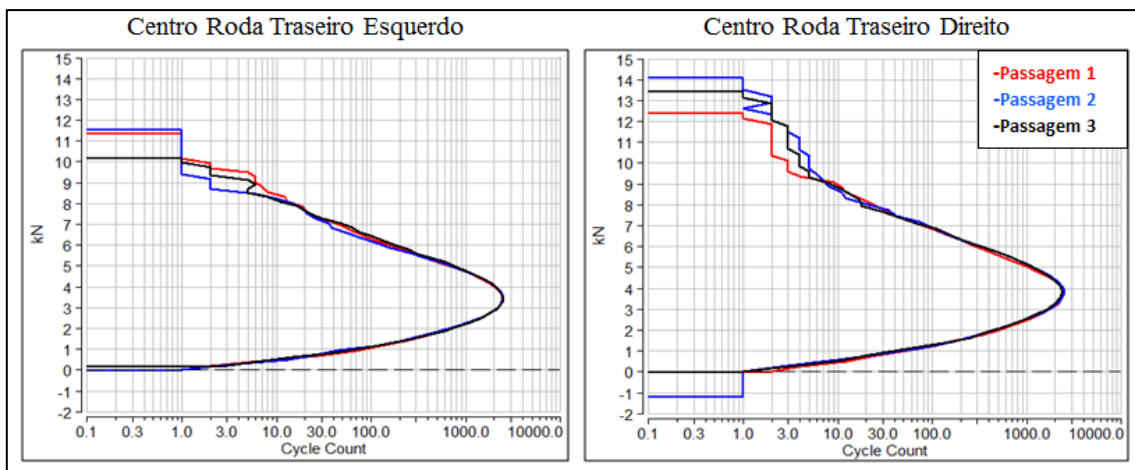


GRÁFICO A12 – Resultados Level Crossing eixo traseiro Projeto 2 no percurso de Calçamento carro carregado – 3 passagens feitas.

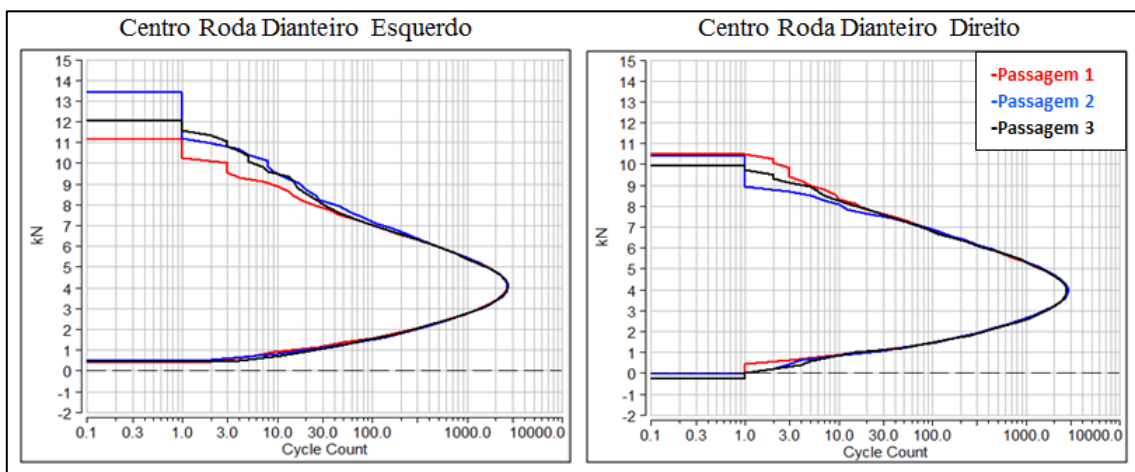


GRÁFICO A13 – Resultados Level Crossing eixo dianteiro Projeto 2 no percurso de Calçamento carro vazio – 3 passagens feitas.

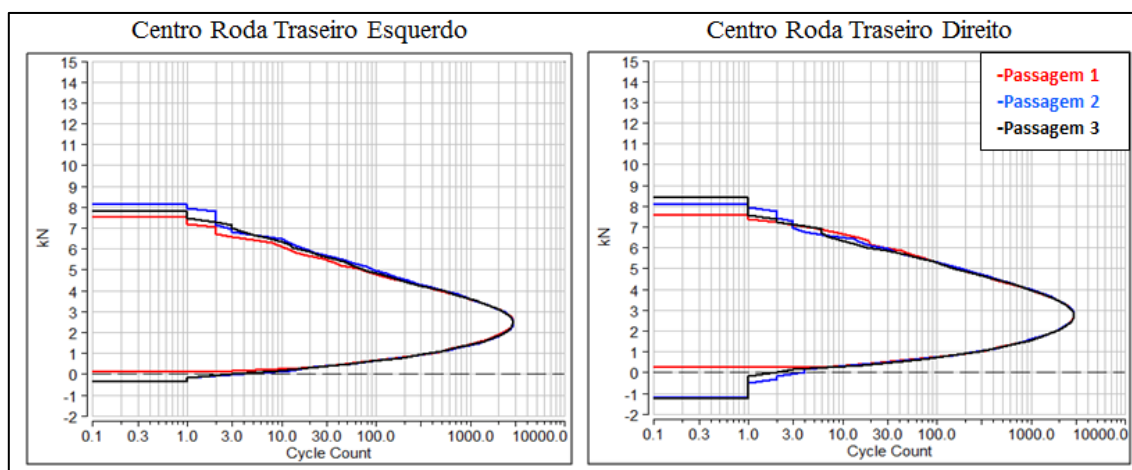


GRÁFICO A14 – Resultados Level Crossing eixo traseiro Projeto 2 no percurso de Calçamento carro vazio – 3 passagens feitas

A Tabela A.2 a seguir apresenta os comparativos percentuais, entre o maior e o menor pico de carga encontrado para as diferentes passagens nos percursos dos gráficos A7 a A14:

TABELA A2
Diferenças percentuais entre maiores e menores picos de cargas no projeto 2 no LDS

Projeto 2							
Carro Carregado				Carro Vazio			
Terra				Terra			
Roda Dianteira Direita	Roda Dianteira Esquerda	Roda Traseira Direita	Roda Traseira Esquerda	Roda Dianteira Direita	Roda Dianteira Esquerda	Roda Traseira Direita	Roda Traseira Esquerda
2.5%	21.9%	18.2%	1.1%	21.0%	7.0%	5.8%	4.0%
Calçamento				Calçamento			
Roda Dianteira Direita	Roda Dianteira Esquerda	Roda Traseira Direita	Roda Traseira Esquerda	Roda Dianteira Direita	Roda Dianteira Esquerda	Roda Traseira Direita	Roda Traseira Esquerda
47.9%	23.4%	13.3%	13.5%	20.2%	5.5%	8.4%	11.6%

A seguir, nos gráficos A15, A16, A17, A18, A19, A20, A21 e A22 são apresentados os *Level Crossings* das passagens feitas nos percursos de Terra e Calçamento do LDS, dos eixos dianteiro e traseiro, para o projeto 3, na situação do carro vazio e carregado.

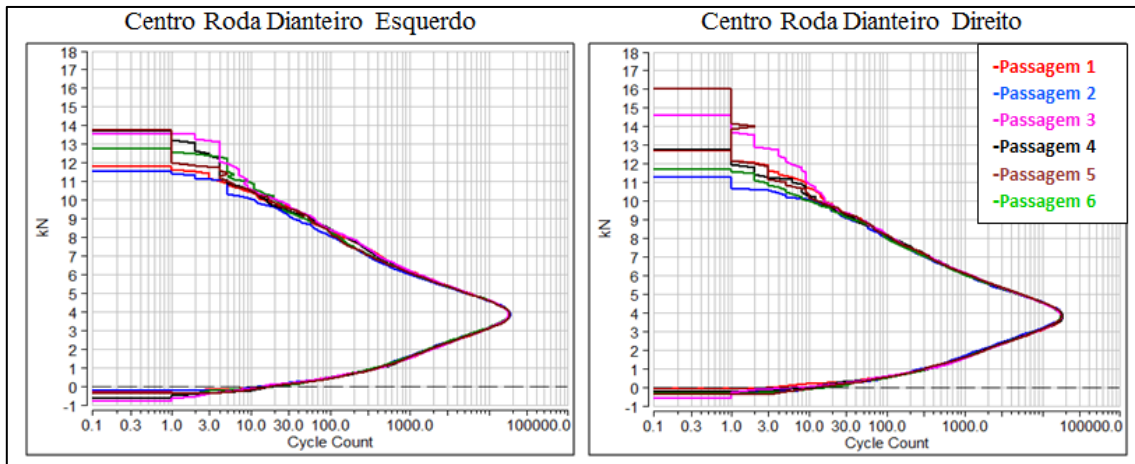


GRÁFICO A15 – Resultados Level Crossing eixo dianteiro Projeto 3 no percurso de Terra carro carregado – 6 passagens feitas

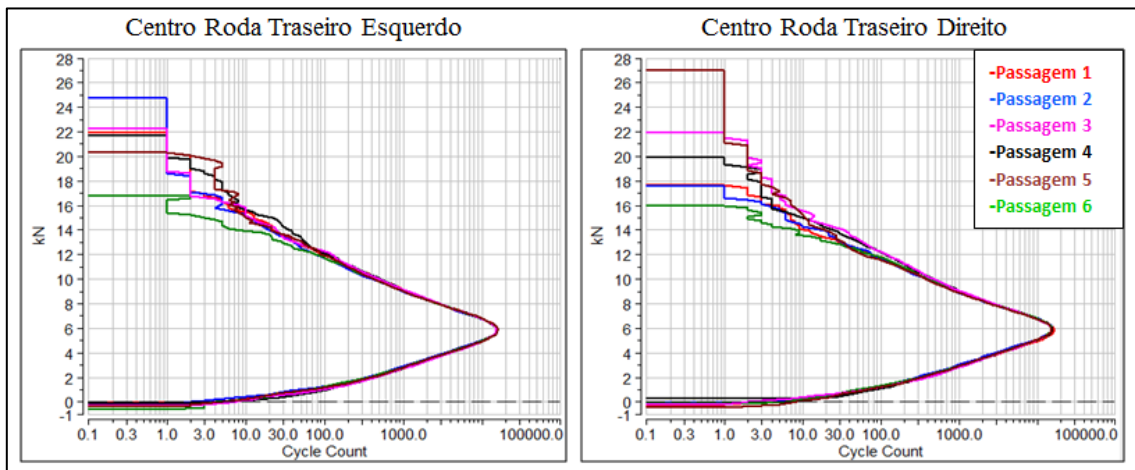


GRÁFICO A16 – Resultados Level Crossing eixo traseiro Projeto 3 no percurso de Terra carro carregado – 6 passagens feitas.

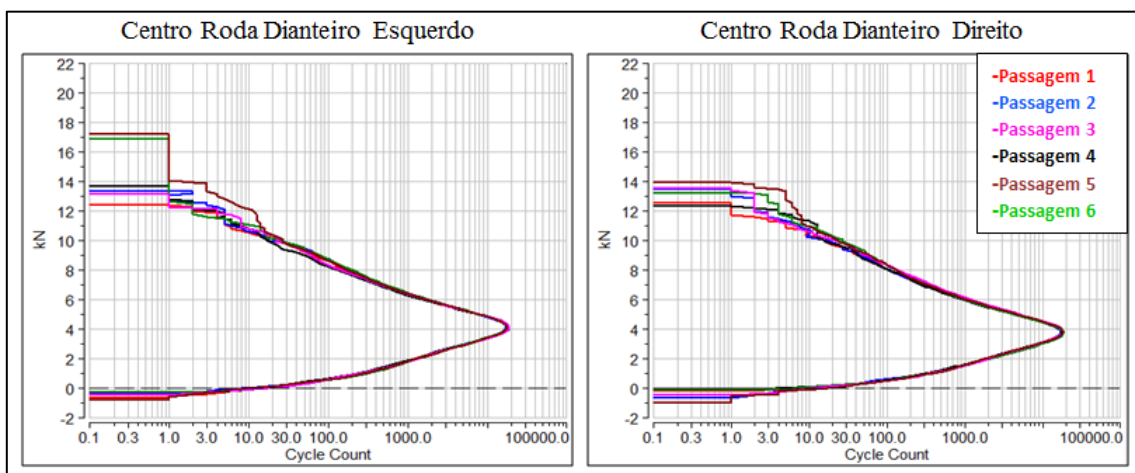


GRÁFICO A17 – Resultados Level Crossing eixo dianteiro Projeto 3 no percurso de Terra carro vazio – 6 passagens feitas.

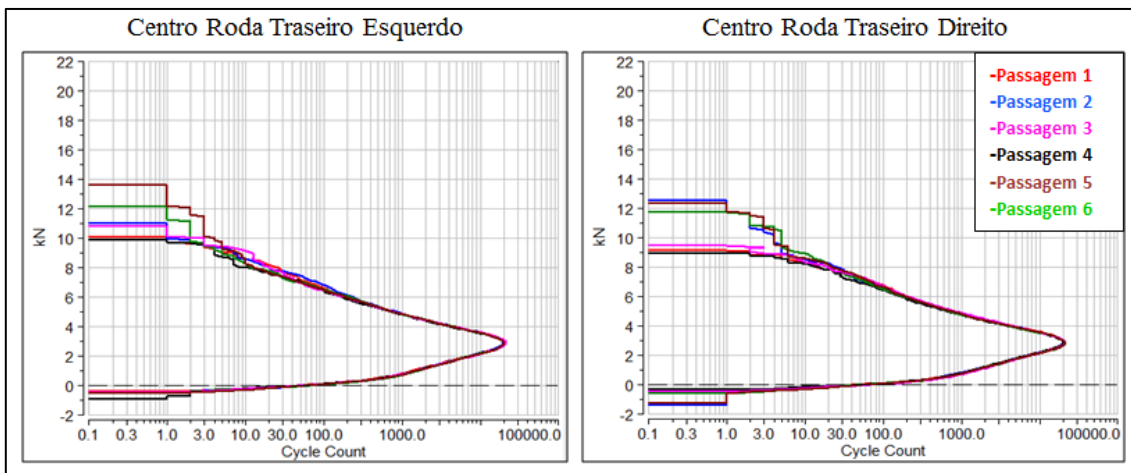


GRÁFICO A18 – Resultados Level Crossing eixo traseiro Projeto 3 no percurso de Terra carro vazio – 6 passagens feitas.

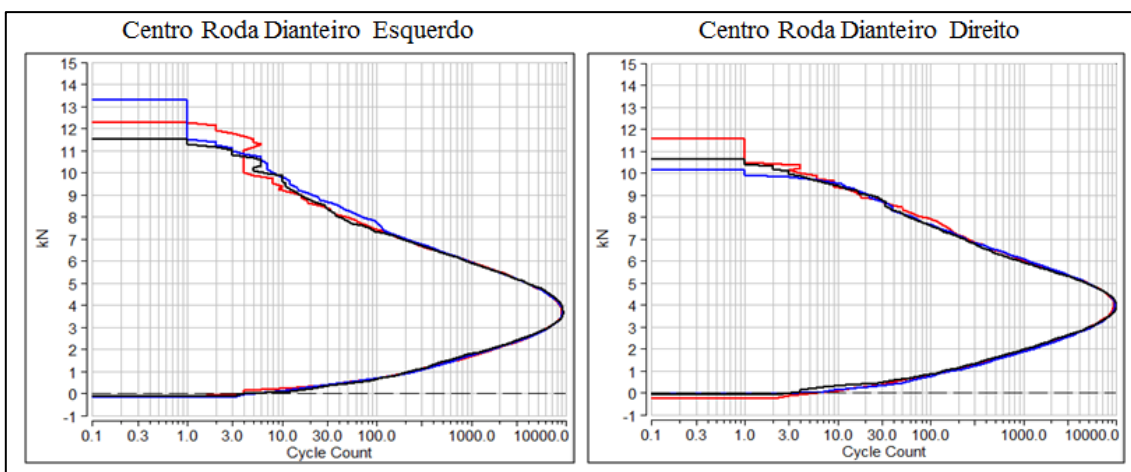


GRÁFICO A19 – Resultados Level Crossing eixo dianteiro Projeto 3 no percurso de Calçamento carro carregado – 3 passagens feitas.

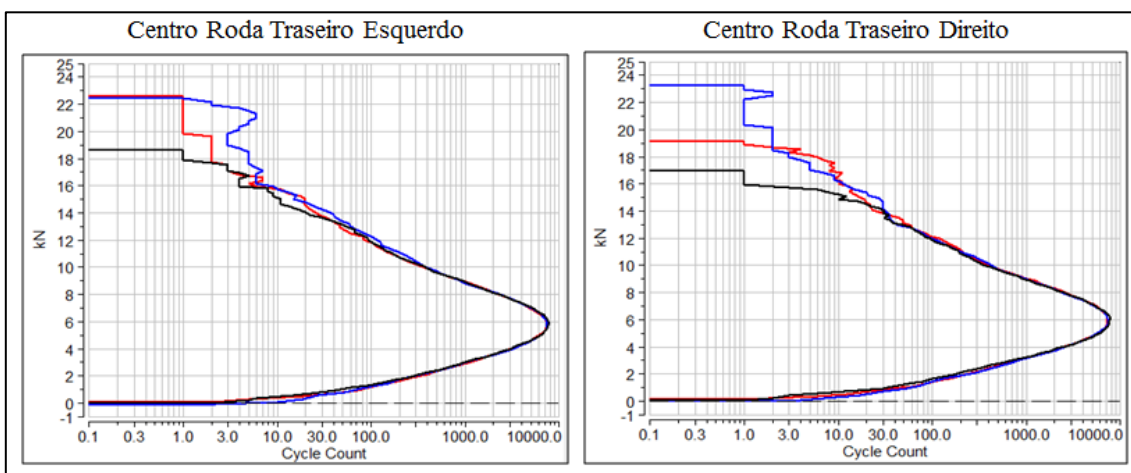


GRÁFICO A20 – Resultados Level Crossing eixo traseiro Projeto 3 no percurso de Calçamento carro carregado – 3 passagens feitas.

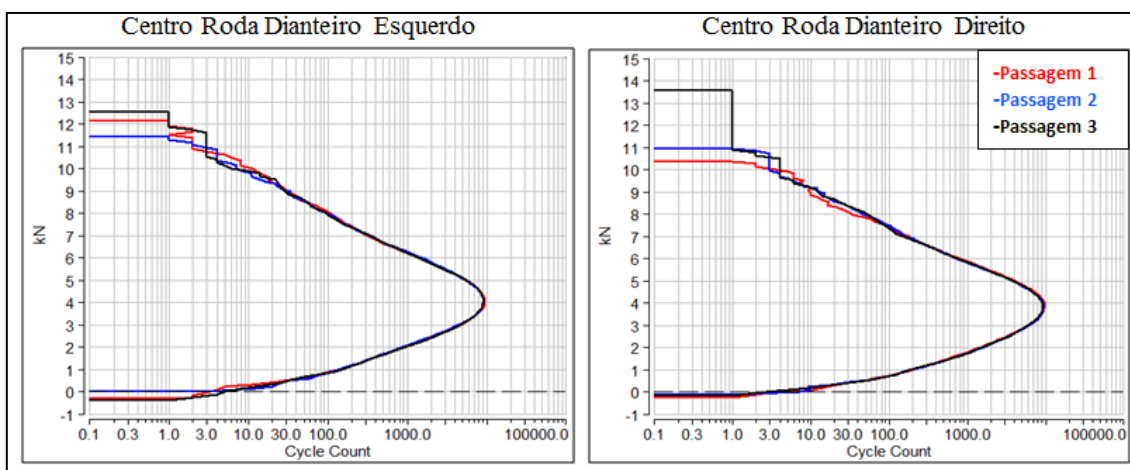


GRÁFICO A21 – Resultados Level Crossing eixo dianteiro Projeto 3 no percurso de Calçamento carro vazio – 3 passagens feitas.

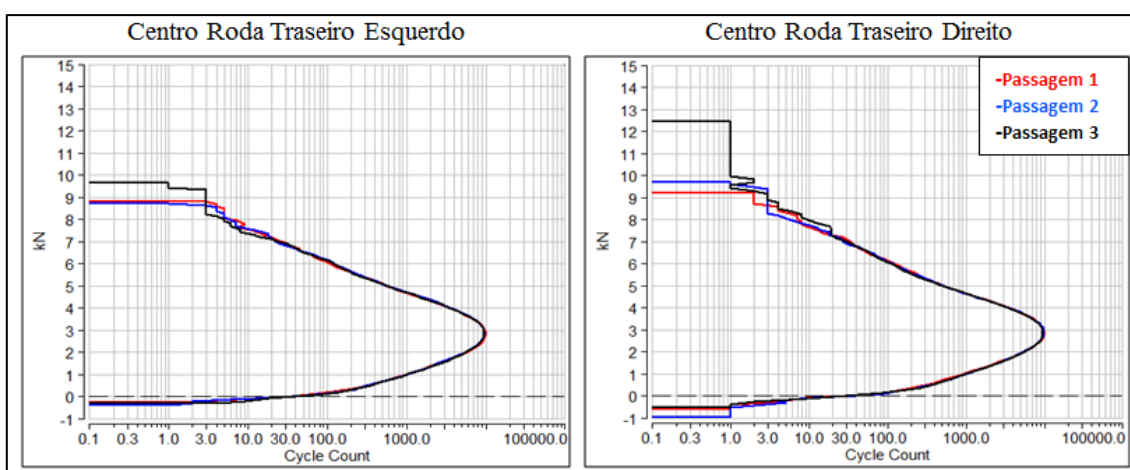


GRÁFICO A22 – Resultados Level Crossing eixo dianteiro Projeto 3 no percurso de Calçamento carro vazio – 3 passagens feitas.

A Tabela A.3 a seguir apresenta os comparativos percentuais, entre o maior e o menor pico de carga encontrado para as diferentes passagens nos percursos dos gráficos A15 a A22:

TABELA A3

Diferenças percentuais entre maiores e menores picos de cargas no projeto 3 no LDS

Projeto 3							
Carro Carregado				Carro Vazio			
Terra				Terra			
Roda Dianteira Direita	Roda Dianteira Esquerda	Roda Traseira Direita	Roda Traseira Esquerda	Roda Dianteira Direita	Roda Dianteira Esquerda	Roda Traseira Direita	Roda Traseira Esquerda
18.4%	41.8%	47.0%	69.6%	38.6%	12.8%	38.2%	40.3%
Caçamento				Caçamento			
Roda Dianteira Direita	Roda Dianteira Esquerda	Roda Traseira Direita	Roda Traseira Esquerda	Roda Dianteira Direita	Roda Dianteira Esquerda	Roda Traseira Direita	Roda Traseira Esquerda
15.6%	14.3%	21.2%	36.9%	9.9%	30.9%	10.4%	35.4%

A seguir, nos gráficos A23, A24, A25, A26, A27, A28, A29 e A30 são apresentados os *Level Crossings* das passagens feitas nos percursos de Terra e Caçamento do LDS, dos eixos dianteiro e traseiro, para o projeto 4, na situação do carro vazio e carregado.

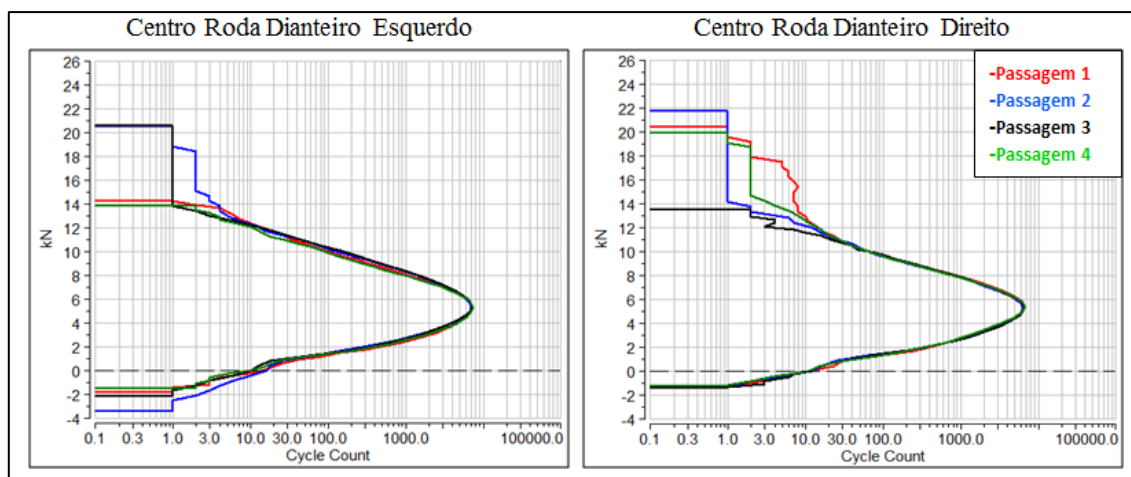


GRÁFICO A23 – Resultados Level Crossing eixo dianteiro Projeto 4 no percurso de Terra carro carregado – 4 passagens feitas.

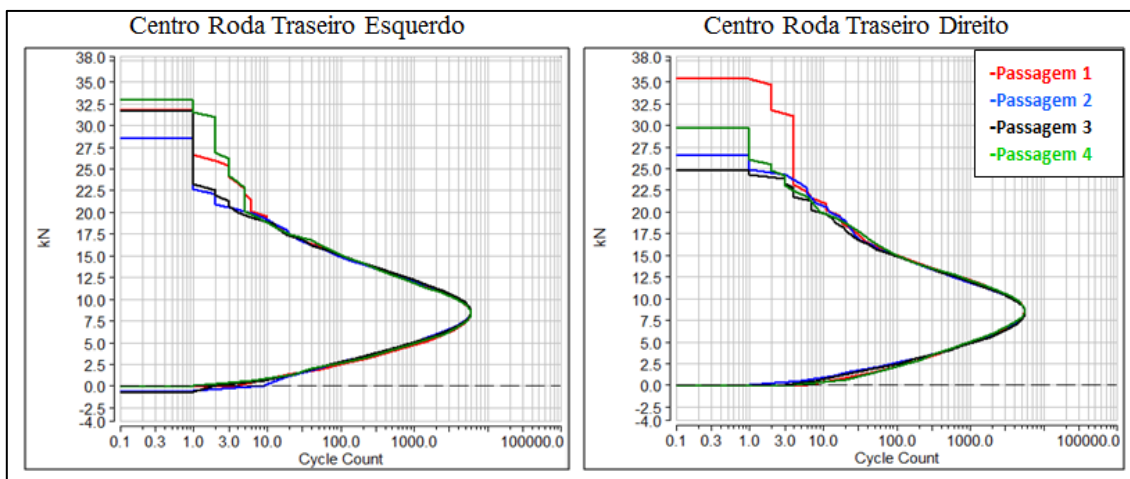


GRÁFICO A24 – Resultados Level Crossing eixo traseiro Projeto 4 no percurso de Terra carro carregado – 4 passagens feitas.

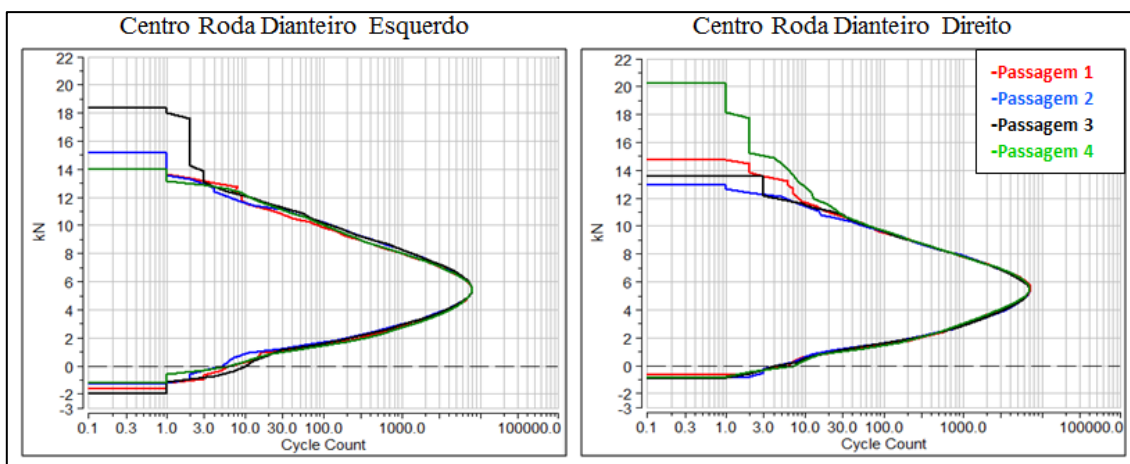


GRÁFICO A25 – Resultados Level Crossing eixo dianteiro Projeto 4 no percurso de Terra carro vazio – 4 passagens feitas.

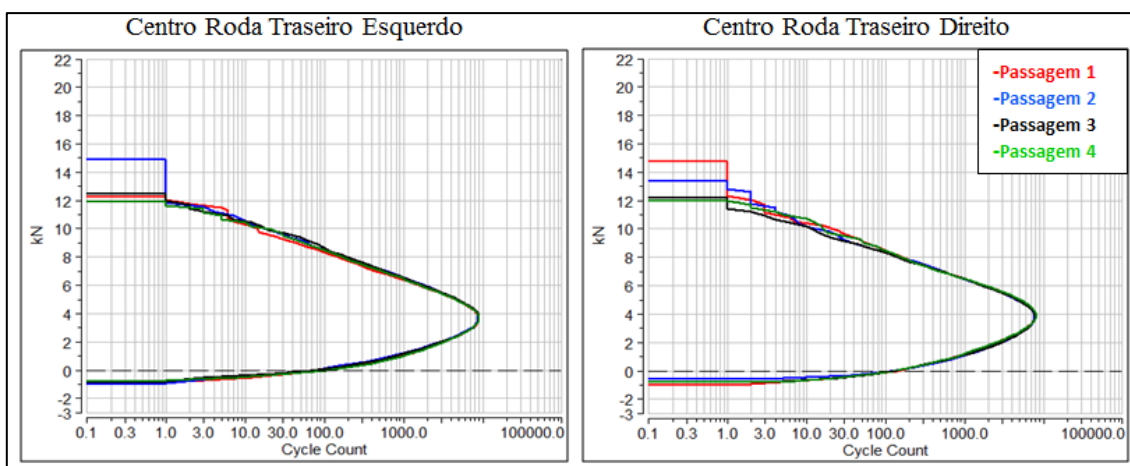


GRÁFICO A26 – Resultados Level Crossing eixo traseiro Projeto 4 no percurso de Terra carro vazio – 4 passagens feitas.

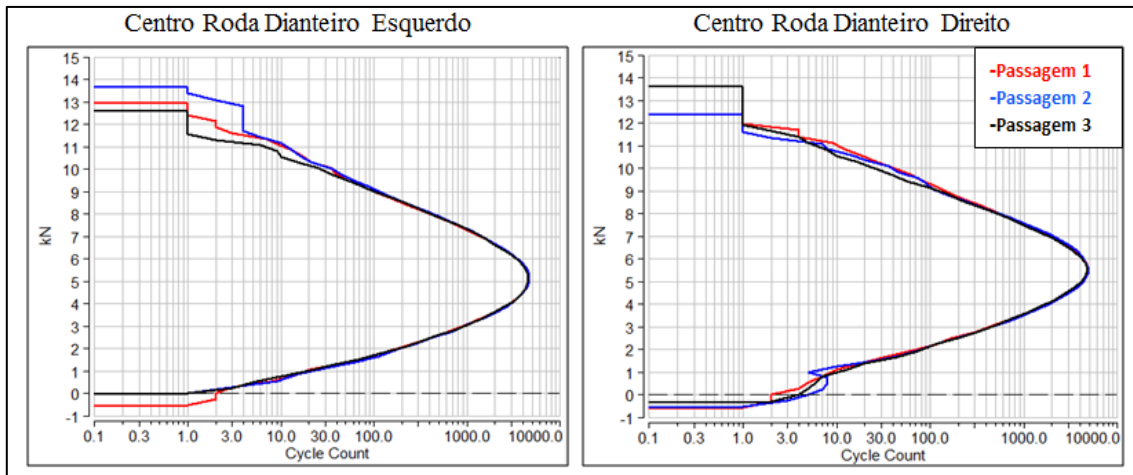


GRÁFICO A27 – Resultados Level Crossing eixo dianteiro Projeto 4 no percurso de Calçamento carro carregado – 3 passagens feitas.

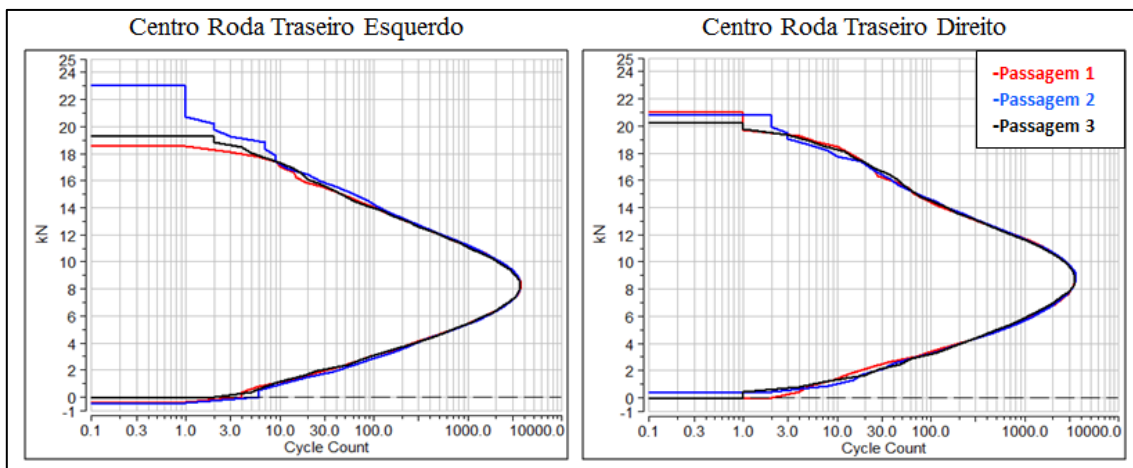


GRÁFICO A28 – Resultados Level Crossing eixo traseiro Projeto 4 no percurso de Calçamento carro carregado – 3 passagens feitas.

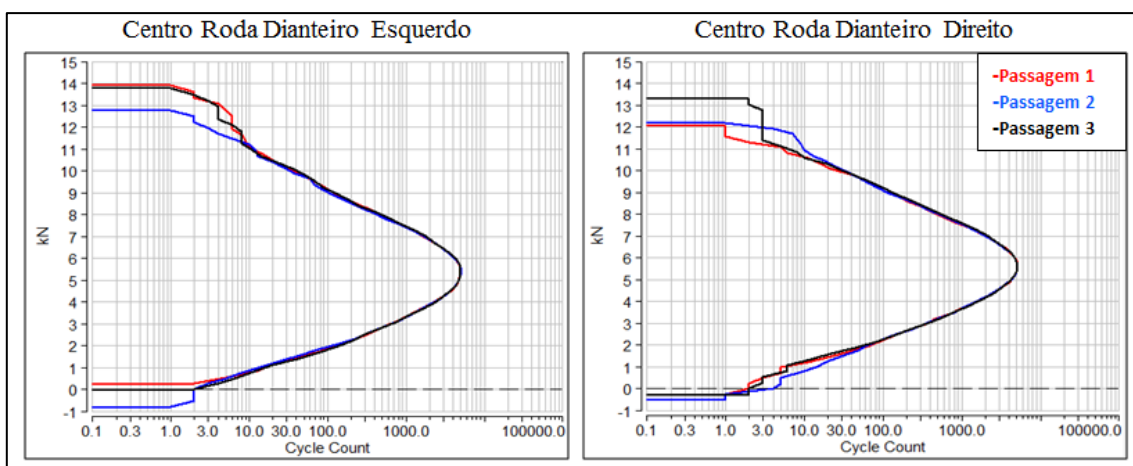


GRÁFICO A29 – Resultados Level Crossing eixo dianteiro Projeto 4 no percurso de Calçamento carro carregado – 3 passagens feitas.

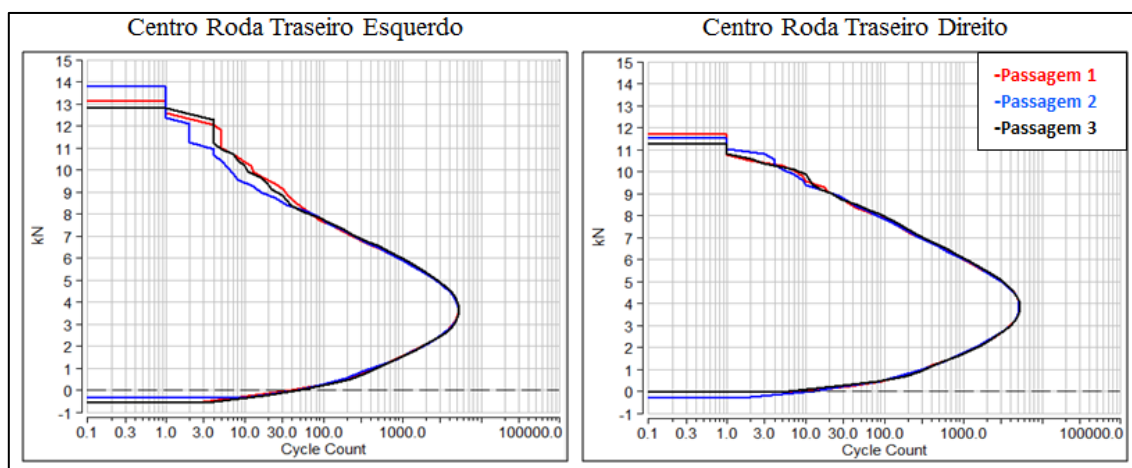


GRÁFICO A30 – Resultados Level Crossing eixo traseiro Projeto 4 no percurso de Calçamento carro carregado – 3 passagens feitas.

E finalmente a tabela A4 condensa os resultados de diferenças percentuais entre os picos de cargas do projeto 4:

TABELA A4
Diferenças percentuais entre maiores e menores picos de cargas no projeto 4 no LDS

Projeto 4							
Carro Carregado				Carro Vazio			
Terra				Terra			
Roda Dianteira Direita	Roda Dianteira Esquerda	Roda Traseira Direita	Roda Traseira Esquerda	Roda Dianteira Direita	Roda Dianteira Esquerda	Roda Traseira Direita	Roda Traseira Esquerda
49.3%	61.0%	15.5%	42.4%	31.0%	56.3%	25.2%	23.3%
Calçamento				Calçamento			
Roda Dianteira Direita	Roda Dianteira Esquerda	Roda Traseira Direita	Roda Traseira Esquerda	Roda Dianteira Direita	Roda Dianteira Esquerda	Roda Traseira Direita	Roda Traseira Esquerda
8.3%	10.4%	24.4%	4.1%	9.1%	10.4%	7.6%	3.9%